中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 1 期: 115 ~ 138
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com





评 述 中国综合地层和时间框架专辑

中国泥盆纪综合地层和时间框架

郄文昆[1*], 马学平[2], 徐洪河[3], 乔丽[1], 梁昆[1], 郭文[4], 宋俊俊[4], 陈波[3], 卢建峰[4]

1. 中国科学院南京地质古生物研究所和生物演化与环境卓越中心, 资源地层学与古地理学重点实验室, 南京 210008;
2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
3. 中国科学院南京地质古生物研究所和生物演化与环境卓越中心, 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008;
4. 中国科学院南京地质古生物研究所和生物演化与环境卓越中心, 南京 210008
* E-mail: wkqie@nigpas.ac.cn

收稿日期: 2017-11-13; 收修改稿日期: 2018-03-22; 接受日期: 2018-08-13; 网络版发表日期: 2018-10-12
中国科学院战略性先导科技专项B类项目(编号: XDB26000000, XDB18000000)、国家自然科学基金项目(批准号: 41290260, 41772004, 41772012)、科技部基础性专项项目(编号: 2013FY111000)和现代古生物学和地层学国家重点实验室资助

摘要 国际泥盆系标准年代地层单位7个阶底界的全球层型剖面与点位(GSSP)于1996年已全部确立, 目前迫切需要开展"后层型"精细地层对比研究. 中国高精度泥盆纪综合地层和时间框架的建立对实现全球不同古地理背景下沉积记录的精细对比和理解这一关键转折期生物与气候环境的演变过程具有重要意义. 本文简要概述了中国泥盆纪年代地层的研究历史和研究现状, 以华南及邻区研究程度较高的生物地层和年代地层格架为基础, 结合近年来碳同位素地层、事件地层和放射性同位素年龄的研究成果, 首次建立中国泥盆纪综合地层框架, 为实现区域地层高精度的划分与对比奠定坚实基础. 目前, 中国泥盆纪天文旋回地层和高精度放射性同位素测年的研究比较薄弱, 是今后中国泥盆纪年代地层研究的主要方向.

关键词 泥盆系 年代地层 生物地层 碳同位素地层 事件地层

1 引言

泥盆纪(419.2~358.9Ma)是晚古生代的第一个纪, 以笔石*Uncinatograptus uniformis*(Přibyl, 1940)的首次出现作为开始标志, 持续了大约60.3Ma(Gradstein等, 2012). 在此期间, 地球气候系统发生了重大转变, 大气CO_2浓度自地球诞生以来首次迅速降低至近现代水平, 发生了多次气候变冷事件, 全球逐渐从志留纪的"温室地球"转变为石炭纪-二叠纪的"冰室地球"(Joachimski等, 2009; Foster等, 2017). 泥盆纪复杂的气候变化受多种时间尺度作用力的控制: 在百万至千万年时间尺度上, 海陆格局、板块运动和陆地植物群演化是影响全球气候变化的重要因素(Algeo等, 1995; Goddéris等, 2014); 在万年至十万年时间尺度上, 地球轨道力被认为控制着地球气候系统, 进而影响着生命的演化进程(De Vleeschouwer等, 2013). 然而, 由于浅海相区以底栖生物为主, 而陆相沉积基本不连续, 地方性分子占优势地位, 不同沉积相区之间缺少精细的地层划分与对比依据, 导致对泥盆纪生物多样性变化规律、生物演化过程及其与气候环境事件之间的相互关

中文引用格式: 郄文昆, 马学平, 徐洪河, 乔丽, 梁昆, 郭文, 宋俊俊, 陈波, 卢建峰. 2019. 中国泥盆纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 115–138, doi: 10.1360/N072017-00384
英文引用格式: Qie W K, Ma X P, Xu H H, Qiao L, Liang K, Guo W, Song J J, Chen B, Lu J F. 2019. Devonian integrative stratigraphy and timescale of China. Science China Earth Sciences, 62: 112–134, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9259-9

系尚不清楚(Racki, 2005; Kaiser等, 2016). 因此, 建立高精度的综合地层和时间框架, 实现全球泥盆纪地层的精确对比是研究泥盆纪不同时空尺度下海-陆-气相互作用的前提与基础.

年代地层单位"泥盆系"一词最早由Sedgwick和Murchison(1839)提出, 用以指代英格兰Devon郡与老红砂岩同期的沉积物. 1985年, 国际泥盆系标准年代地层系统得以正式确立并沿用至今, 包括下、中和上三个统和七个阶(Ziegler和Klapper,1985). 其中, 下统包括洛赫考夫、布拉格和埃姆斯三个阶, 中统包括艾菲尔和吉维特阶, 而上统则由弗拉阶和法门阶组成(表1). 1972年国际地科联(IUGS)批准的泥盆系底界GSSP是国际地层委员会(ICS)建立的第一个金钉子(Chlupác和Kukal, 1977), 至1996年, 泥盆系的"金钉子"已经全部确立(Yolkin等, 1997). 需要指出的是, 埃姆斯阶底界和泥盆系-石炭系界线的界线层型——"金钉子"自确立之初即受到许多学者的反对, ICS泥盆系分会(SDS)和石炭系分会(SCCS)于2008年正式决定修改埃姆斯阶底界和泥盆系顶界的界线定义和界线位置(Becker, 2009; Aretz, 2010), 修订工作尚在进行中(Slavík和Brett, 2016; Spalletta等, 2017)(表1).

中国泥盆纪地层分布广泛, 类型齐全, 各门类生物化石丰富, 特别是华南及其邻区拥有完整的泥盆纪海相地层, 在完善泥盆纪年代地层格架方面拥有巨大潜力. 中国泥盆纪古生物研究始于19世纪中期, De Koninck (1846)和Davidson (1853)首先报道了华南地区的一些腕足类化石, 至2014年, 全国地层委员会出版的《中国地层表》(2014)完善了中国泥盆纪年代地层系统, 为进一步与国际年代地层单位进行精确对比奠定了基础. 然而, 目前中国泥盆纪区域年代地层单位研究还存在一些不足之处, 主要体现在: (1) 缺少严格的下界定义, 强调单位层型而非界线层型, 且大多数单位层型由岩石地层单位直接转化而来, 有些单位之间不可避免地存在地层重复或间断; (2) 中国的区域年代地层标准建立在华南浅水台地相区, 生物分带精度不高, 生物地层序列跨区对比性较差; (3) 缺少系统而综合的事件地层、化学地层和绝对年龄研究, 单位层型缺少进一步的详细划分. 本文将对中国泥盆纪年代地层的研究历史、近年来的研究现状和研究进展作简要介绍, 提供中国最新的综合地层格架表, 并依据国际最新的研究动态提出今后中国泥盆纪年代地层的主要研究方向.

2 中国泥盆纪年代地层研究历史

中国泥盆系研究已有170余年历史, 始自19世纪中叶零星的化石描述和地质路线调查, 至20世纪30年代开始出现大量的古生物学和地层学专题性研究(冯景兰, 1930; 葛利普, 1931; 乐森璕, 1938). 田奇瑪(1938)在总结中国南方泥盆系研究成果基础上, 依托云南、广西和湖南的几个重点剖面首次进行了统一分类的尝试, 划分出下、中和上泥盆纪(统)和11个标准层(表2). 王钰和俞昌民(1962)对之前泥盆系的研究进行了全面总结, 在田氏分类系统的基础上正式提出中国泥盆纪年代地层单位, 建立了6个地方性阶, 包括下统龙华山阶、"四排阶"或"那高岭阶", 中统郁江阶和东岗岭阶, 上统佘田桥阶和锡矿山阶(表2). 这一时期主要依据腕足类和珊瑚类等底栖生物化石的地层分布作为泥盆纪地层的分类基础.

20世纪70年代开始, 随着牙形刺、菊石、笔石和竹节石等泥盆纪重要生物类群在中国的不断报道和浮游生物地层序列的初步建立(阮亦萍, 1979; 白顺良等, 1982; 阮亦萍和穆道成, 1989; 穆恩之等, 1988; 王成源, 1989), 一些关键年代地层界线得以识别, 并逐步实现了国内外生物地层的精确对比(王钰等, 1981; Yu, 1988), 以桂林南边村全球泥盆系-石炭系界线辅助层型剖面的正式确立为代表性成果(Paproth等, 1991). 依据浮游生物地层的研究进展, 王钰等(1974)、侯鸿飞(1978)和侯鸿飞等(1988)对中国的泥盆纪建阶方案进行了修正与补充, 下统阶一级单位改称莲花山阶和那高岭阶, 将郁江阶划归至下泥盆统、四排阶归为下泥盆统上部, 建立应堂阶以对应于中泥盆统下部的地层单位, 这一划分方案一直沿用至21世纪初(表2).

20世纪90年代至今, 国内学者在不断完善泥盆纪生物地层格架的同时, 积极开展化学地层、事件地层、旋回地层和放射性同位素年龄研究(Bai等, 1994; Chen等, 2005; 龚一鸣等, 2004; Liu等, 2012; Chang等, 2017), 应用多学科手段实现不同地区关键地层的精确对比, 但研究成果主要集中在年代地层界线附近的3~5个牙形刺带内, 缺少泥盆纪各阶内部系统的综合地层学研究. 在此期间, 侯鸿飞和马学平(2005)重新定义了邵东阶, 用以代表中国法门期最晚期的沉积, 以有孔虫

表 1　国际与中国泥盆纪年代地层单位对比表[a)]

国际年代地层单位						中国年代地层单位		
统	阶	亚阶	界线定义	GSSP位置和界线	IUGS批准时间	阶	单位层型定义	参考剖面
	杜内阶		*S. sulcata*首现(C)	法国La Serre E剖面89层底界	1990	杜内阶		
上统	法门阶		***Pr. kockli*首现?** *Pa. triangularis* 首现(C)	法国Coumiac石场剖面32a层底界	1993	邵东阶	*Eoendothyra regularis*首现(F)	广西桂林回龙剖面
						阳朔阶	*Palmatolepis r. trachytera*首现(C)	广西桂林铁山剖面
						锡矿山阶	*Cyrtiopsis-Yunnanella-Sinospirifer*(B) F-F生物大灭绝事件	湖南冷水江锡矿山剖面
	弗拉阶		*A. r. pristina* 首现(C)	法国Montage Noire Col du Poech de La Suque E剖面42层底界	1987	佘田桥阶	*Cyrtospirifer-Manticoceras*动物群	湖南邵东佘田桥剖面
中统	吉维特阶		*P. hemiansatus*首现(C)	摩洛哥Jebel Mech Irdane剖面123层底界	1994	东岗岭阶	*Sunophyllum-Endophyllum-Truncicaninulum*(Cor) *Nowakia otomari*(T)	广西象州马鞍山剖面
	艾菲尔阶		*P. c. partitus*首现(C)	德国Eifel山Wetteldorf剖面21. 25m处, WP30底界	1985	应堂阶	*Xenospirifer fongi-Eospiriferina lachrymosa -Yingtangella sulcatilis*(B) *Utaratuia sinensis*(Cor)	广西象州大乐剖面
下统	埃姆斯阶		***P. excavatus* 114首现?** *P. kitabicus*首现(C)	乌兹别克斯坦Zinzilban峡谷9/5层底界	1996	四排阶	原始菊石类*Erbenoceras*等出现 (A)	广西武宣二塘-象州大乐剖面
						郁江阶	*R. tonkinensis-Dicoelostrophia*(B)	广西横县六景剖面
	布拉格阶		*E. s. sulcatus*首现(C)	捷克Velka Chuchle石场剖面12层底界	1989	那高岭阶	*Orientospirifer nakaolingensis*(B)	广西横县六景剖面
	洛赫考夫阶		*U. uniformis*首现(G)	捷克布拉格Klonk剖面20层	1972	莲花山阶	*Zosterophyllum-Uncatoella verticillata*(P) *Polybranchiaspis-Yunnanolepis*(Fi) *P. scitulus, P. trilobutus, P. cornuformis*首现(V)	云南曲靖西山村剖面

a) 据侯鸿飞等未刊资料(2011)、《中国地层表》(2014)和Geological Time Scale 2016改编. A=菊石类; B=腕足类; C=牙形刺; Cor=珊瑚类; F=有孔虫; Fi=鱼类; G=笔石; T=竹节石; V=脊椎动物

*Eoendothyra regularis*的首次出现作为开始标志. 阳朔阶是全国地层委员会最新建立的一个阶, 对应于法门阶中上部, 以牙形刺*Palmatolepis rugosa trachytera*的首次出现为标志(表1). 鉴于国际标准年代地层系统已于1985年正式确立, 国内许多学者主张直接采用国际统一阶名系统, 而弃用中国地方性阶名, 以实现地质学家共同语言的广泛应用, 而另外部分学者则认为地方性地层单位系统的建立与国际标准地层单位的使用不应是相互排斥的, 而是一个对立、统一的过程, 体现了各国泥盆纪地层研究的重大进展, 这两种观点长期并存(侯鸿飞等, 1988; Liao和Ruan, 2003; 侯鸿飞和马学平, 2005; 王成源和彭善池, 2017) (表2).

3　中国泥盆纪综合地层框架

泥盆纪年代地层学研究旨在建立419.2~358.9Ma期间的精时地层格架, 实现全球不同古地理背景下沉积记录的精细对比. 迄今为止, 通过生物地层与放射性同位素年龄的综合研究, 已建立起泥盆纪的地质年代表, 单位为百万年(Becker等, 2012)(图1). 然而, 泥盆纪剧烈的气候变化及其引起的生物和环境事件的持续时间通常仅为几万年至几十万年(De Vleeschouwer等, 2013; Myrow等, 2013), 生物地层提供的时间格架不足以满足研究泥盆纪重大生物和环境事件的需要. 依据生物地层建立时间框架, 放射性同位素年龄提供精确的年龄控制点, 在此基础上通过化学地层学、旋回地层学和定量地层学综合研究, 建立更高精度的地层划分对比框架以及通过古气候替代性指标识别米兰科维奇天文旋回, 通过天文调谐来精确标定沉积物中各种界线年龄和地质事件的发生时间, 是泥盆纪年代地层研究的发展趋势. 本文主要依据华南及邻区的泥盆系标准序列, 提供中国最新的泥盆纪综合地层框架表(图1~3).

3.1　泥盆纪生物地层序列

生物地层是年代地层划分与对比的基础, 王成源

表 2　中国泥盆纪年代地层单位划分沿革

田奇瑪 (1938)			王钰和俞昌民 (1962)			侯鸿飞 (1978)	侯鸿飞等 (1988)	钟铿等 (1992)	王成源和彭善池 (2017)	侯鸿飞和马学平 (2005)		全国地层委员会等 (2014)	
上统（湖南统）	锡矿山群	马牯脑灰岩	上统（湖南统）	锡矿山阶		上统	锡矿山阶	上统	法门阶	上统	邵东阶	上统	邵东阶
											“待建阶”		阳朔阶
		兔子塘灰岩									锡矿山阶		锡矿山阶
	佘田桥群	佘田桥灰岩 龙口冲层		佘田桥阶			佘田桥阶		弗拉阶		佘田桥阶		佘田桥阶
中统（广西统）	独山群	鸡窝寨灰岩 宋家桥层 鸡泡灰岩	中统（广西统）	东岗岭阶		中统	东岗岭阶	中统	吉维特阶	中统	东岗岭阶	中统	东岗岭阶
	象县群	邦寨砂岩 吴村页岩		郁江阶	跳马涧亚阶		应堂阶		艾菲尔阶		应堂阶		应堂阶
下统（修仁统）		四排页岩				下统	四排阶	下统	埃姆斯阶	下统	四排阶	下统	四排阶
					郁江亚阶		郁江阶				郁江阶		郁江阶
			下统（云南统）	那高岭阶 “四排阶”			那高岭阶		布拉格阶		那高岭阶		那高岭阶
		龙华山砂岩		龙华山阶			莲花山阶		洛赫考夫阶		“待建阶”		莲花山阶

(2000)、蔡重阳(2000)和Liao和Ruan(2003)对中国泥盆纪的主要化石门类的生物地层序列已做过详尽总结，本文不再一一赘述，主要以图表形式加以表述(图1、2)，并着重介绍近年来有关牙形刺、笔石、介形类、腕足类、四射珊瑚、孢粉和植物生物地层方面取得的一些重要研究进展和新的认识.

3.1.1　牙形刺

牙形刺是泥盆纪的主导化石门类, 泥盆系7个国际标准阶的界线定义除泥盆系底界外均以牙形刺分子的首次出现作为标志(表1). 国际牙形刺生物地层序列共包含68个生物带，是海洋沉积物划分和对比的最重要依据，为泥盆纪提供了高分辨率的时间格架，单个牙形刺带对应于几十万至百万年(图1). 王成源(1989)、Ji和Ziegler(1993)和Bai等(1994)系统地研究了华南地区一系列以“深水相”沉积为主的剖面，逐步完善了泥盆纪牙形刺生物地层序列，成为国际对比的重要依据. 最近，王成源(2018)对中国泥盆纪牙形刺的系统分类描述和生物地层进行了系统的总结和修订，在浮游相区共识别出58个牙形刺生物带，其中，埃姆斯阶及之上的生物带可以与国际标准牙形刺生物带进行精确对比(图1).

泥盆系底界，即洛赫考夫阶底界“金钉子”以笔石 *U. uniformis* (Přibyl, 1940)的首次出现为标志(表1)，确立之初，辅助识别标志包括三叶虫*Walburgella rugulosa rugosa*和牙形刺*Caudicriodus woschmidti*. 该牙形刺分子见于中国川北、川西、滇西和内蒙古等地的下普通沟组、榕树组、山江组和阿鲁共组，一直以来被认为代表了中国泥盆纪最早期的沉积(王成源，1981；王平, 2006; 王成源等, 2009). 然而, Carls等(2007)发现泥

年龄(Ma): 360, 362, 364, 366, 368, 370, 372, 374, 376, 378, 380, 382, 384, 386, 388, 390, 392, 394, 396, 398, 400, 402, 404, 406, 408, 410, 412, 414, 416, 418, 420

国际年代地层 统: 上统; 中统; 下统; 志留系

国际年代地层 阶: 杜内阶; 法门阶; 弗拉阶; 吉维特阶; 艾菲尔阶; 埃姆斯阶; 布拉格阶; 洛赫考夫阶

国际标准牙形刺带: S. sulcata; S. praesulcata; Pa.g.expansa; Pa.p.postera; Pa.r.trachytera; Pa. marginifera; Pa.rhomboidea; Pa.crepida; Pa. triangularis; Pa.linguiformis; 13; Pa.rhenana; 12; 11; Pa. jamieae; 10; Pa.hassi; 9; 8; 7; Pa.punctata; 6; 5; Pa.transitans; 4; Mesotaxis guanwushanensis (=falsiovalis); 3; 2; 1; norrisi; K.disparilis; S.hermanni; P.varcus; P.hemiansatus; P.ensensis; T.k.kockelianus; P.c.costatus; P.c.partitus; P. c. patulus; P. serotinus; P. inversus; Polygnathus nothoperbonus; P. gronbergi; P. excavatus; P. kitabicus; P. pireneae; G. kindlei; G. irregularis; P. gilberti; M. pandora; A. trigonicus; L. transitans; L. eleanorae; L. omoalpha; Caudicriodus postwoschmidti; Caudicriodus hesperius; D. detorta

极性

年代地层界线年龄: 358.9±0.4 新泥盆系顶界标志(讨论中); 371.93-371.78; 382.7±1.6; 387.7±0.8; 393.3±1.2; 新埃姆斯阶底界标志(讨论中) excavatus 114 首次出现; 407.6±2.6; 410.8±2.8; 419.2±3.2

中国地方阶 统: 上统; 中统; 下统; 志留系

中国地方阶 阶: 杜内阶; 邵东阶; 阳朔阶; 锡矿山阶; 佘田桥阶; 东岗岭阶; 应堂阶; 四排阶; 郁江阶; 那高岭阶; 莲花山阶

浮游相生物地层

牙形刺: S. sulcata; S. praesulcata; Pa.g.expansa; Pa.p.postera; Pa.r.trachytera; Pa. marginifera; Pa.rhomboidea; Pa.crepida; Pa. triangularis; Pa.linguiformis; Pa.rhenana; Pa. jamieae; Pa.hassi; Pa.punctata; Pa.transitans; Mesotaxis guanwushanensis (=falsiovalis); K.disparilis; S.hermanni; P.varcus; P.hemiansatus; P.ensensis; T.k.kockelianus; T.k.australis; P.c.costatus; P.c.partitus; P. c. patulus; P. serotinus; P. inversus; Polygnathus nothoperbonus; P. excavatus; P. kitabicus?; P. pireneae; E. sulcatus; Pe. pesavis; An. delta; O. eurekaensis; C.woschmidti

菊石: Gattendorfia; C.euryomphala; Wocklumeria; Clymenia; Platyclymenia; Cheiloceras; Crickites: Crickites, Archoceras, Neomanticoceras, Playfordites; Manticoceras: Beloceras, Mesobeloceras, Prochorites, Proberocerae, Sandbergeroceras, Timanites, Koenenites; Pharciceras: Ponticeras, Pharciceras; M. terebratum; Maenioceras molarium; Cabrieroceras crispiforme; Pinacites-Foordites; Anarcestes; Anetoceras/Anarcestes; Anetoceras: A.(Teneroceras), A.(Anetoceras), (Nandanoceras)

笔石: U. yukonensis; N.himalayensis; Neo. falcarius; Uncinatograptus praehercynicus; Uncinatograptus uniformis; transgrediensis

竹节石: H. u. ultimus; Homoctenus t. tenuicinctus; N. regularis; V. multicostata; V. minuta; Nowakia (N.) otomari; V.guangxiensis; N.albertii; N. s. sulcata; N. s. procera; antiqua; holyocera; N. maureri; N. multicostata; N. holynensis?; Nowakia (N.) richleri; Nowakia (N.) cancellata; Nowakia (N.) elegans; Nowakia (N.) barrandei; N. (Dmitriella) praecursor; Nowakia (N.) zlichovensis; G. xizangensis; Nowakia (Turkestanella) acuaria acuaria; P. intermedia; H. bohemica

介形类: R. latior; R. latior-hemisphaerica Int.; Maternella hemisphaerica; M. dichotoma; R. eocostata; Richteria serratostriata-Nehdentomis nehdensis; F. sigmoidale; En. splendens; splen.-R.reichi int.; Rabienella reichi; Ra. schmidti; Rabienella volki; Rabienella materni; materni/cicat. Int.; barrandei; bar./cicat. Int.; B. cicatricosa; B. cicatricosa-F. torleyi int.; Franklinella torleyi; B. subrecta; Bertillonella praeerecta; R. nayiensis; Richteria longisulcata; Bisulco. tuberculata; Trisulco. trisulcata; Monosulco. beijuntangensis

图 1 中国泥盆纪年代地层和浮游相生物地层

国际标准年代地层单位、牙形刺带和绝对年龄据Becker等(2012)和Percival等(2018); 磁性地层据Becker等(2012)和Ogg(2016); 中国地方性年代地层单位据《中国地层表》(2014); 牙形刺生物带据王成源(2018); 菊石生物带据Liao和Ruan(2003); 笔石据穆恩之和倪寓南(1975)和Chen等(2015); 竹节石生物带据阮亦萍和穆道成(1989); 介形类生物带据王尚启(2009)

栏目	单元(自上而下)
年龄(Ma)	360; 362; 364; 366; 368; 370; 372; 374; 376; 378; 380; 382; 384; 386; 388; 390; 392; 394; 396; 398; 400; 402; 404; 406; 408; 410; 412; 414; 416; 418; 420
年代地层单位: 统	上统; 中统; 下统
年代地层单位: 阶	杜内阶; 法门阶; 弗拉阶; 吉维特阶; 艾菲尔阶; 埃姆斯阶; 布拉格阶; 洛赫考夫阶; 志留系
年代地层单位: 地方阶	邵东阶; 阳朔阶; 锡矿山阶; 佘田桥阶; 东岗岭阶; 应堂阶; 四排阶; 郁江阶; 那高岭阶; 莲花山阶
浅海相和非海相生物地层: 腕足	Yan. dushanensis-Plico. ornatus-Trifi. longhuiensis; Nayunnella-Hunanospirifer; Yunnanella-Sinospirifer (Dzieduszy); Cyrtospirifer; "Leiorhynchus"; Stringocephalus; Athyrisina-Yingtangella-Xenospirifer (Vallo.-Penta.-Cyrti.); Euryspirifer shujiapinensis; Otospirifer shipaiensis; Trigonospirifer trigonata (Zdimir; Costanoplia-Plectodonta); Howellella fecunda-Reticulariopsis ertangensis (Sinathyris); Rostrospirifer tonkinensis-Dicoelostrophia; Orientospirifer nakaolingensis; Spirigerina supermarginalis
珊瑚	Cystophrentis; Ceriphyllum; Smithiphyllum; Peneckiella-Pseudozaphrentis; Sinodisphyllum; Endophyllum-Sunophyllum; Dendrostella-Columnaria; Utaratuia-Breviseptophyllum; Psydracophyllum-Leptoinophyllum; Trapezophyllum; Lyrielasma-Xiangzhouphyllum; Siphonophrentis-Stereolasma; Xystriphylloides-Heterophaulactis; Chalcidophyllum-Eoglossophyllum
微体脊椎动物[a]	Acanthodes guizhouensis; Phoebodus cf. Ph. limpidus; Acanthodes-Ctenacanthus; Phoebodus bifurcatus; Acanthodes-Ohiolepis; Acanthodes dublinensis; Dangdouichthys liui; Wuxuanichthys wangi; Cheiracanthoides wangi; Cheiracanthoides dolosus; Gomphonchus liujingensis; Poracanthodes cf. P. porosus; Poracanthodes zoigenensis
宏体脊椎动物	Sinolepis; Remigolepis; Changyanophyton-Chirodipterus; Panxiosteus-Eastmanosteus; Bothriolepis kwangtungensis-B. lochangensis; Bothriolepis sinensis-Hunanolepis; Wudinolepis-Yinosteus; Kueichowlepis-Sinopetalichthys; Sanchaspis-Asiaspis; Diabolepis-Nanpanaspis; P. liaojiaoshanensis-Laxaspis
几丁虫[b]	Cingulochitina sp.; Angochitina sp.; Fungochitina sp.; Gr.pilosa; Ramochitina marettensis; Bursachitina riclonensis; Ramochitina jouannensis; Bu. bulbosa; An. comosa; Angochitina chlupaci
孢粉	le.-nitidus (LN); le.-explanatus (LE); R.lepidophyta-K. literatus (LL); R.lepidophyta-K. literatus (LV); Spelaeotri. lepidophytus-Granulatispor hunanensis (LH); S. concinnus-H.devonicus (CD); Retusotriletes-Cymbo.-Ancyrospora (RCA); C. velatus-R. langi (VL); Calamospora divisa-Grandispora spp. (DG); Retusotri. triangulatus-E. annulatus (TA); Very.-Micrhy.-Cymatisph (VMC); Retuso.-Acan.-Stenozonotri (RAS); Leiotriletes-Punctatispor (IP); Streelispora granulata-A.chulus (GC); Streelispora newportensis-Chelinospora cassicula (NC)
植物	Sublepidodendron-Shougangia-Hamatophyton; Archaeopteris-Leptophloeum; Minarodendron-Leclercqia; Serrulacaulis[c]; Psilophyton-Hsüa; Zosterophyllum-Yunia; Zosterophyllum-Xitunia

图 2　中国泥盆纪浅海相与非海相生物地层

国际标准年代地层单位和绝对年龄据Becker等(2012)和Percival等(2018); 中国地方性年代地层单位据《中国地层表》(2014); 腕足类组合据侯鸿飞等(2011)未刊资料; 珊瑚类组合据Liao和Ruan(2003); 微体和宏体脊椎动物据Zhu等(2000); 几丁虫序列据Geng等(2000); 孢粉组合据高联达(1990)和欧阳舒等(2017). a) 据华南、滇西和秦岭区生物组合; b) 据华南和羌塘区几丁虫组合; c) 据西准噶尔区植物群

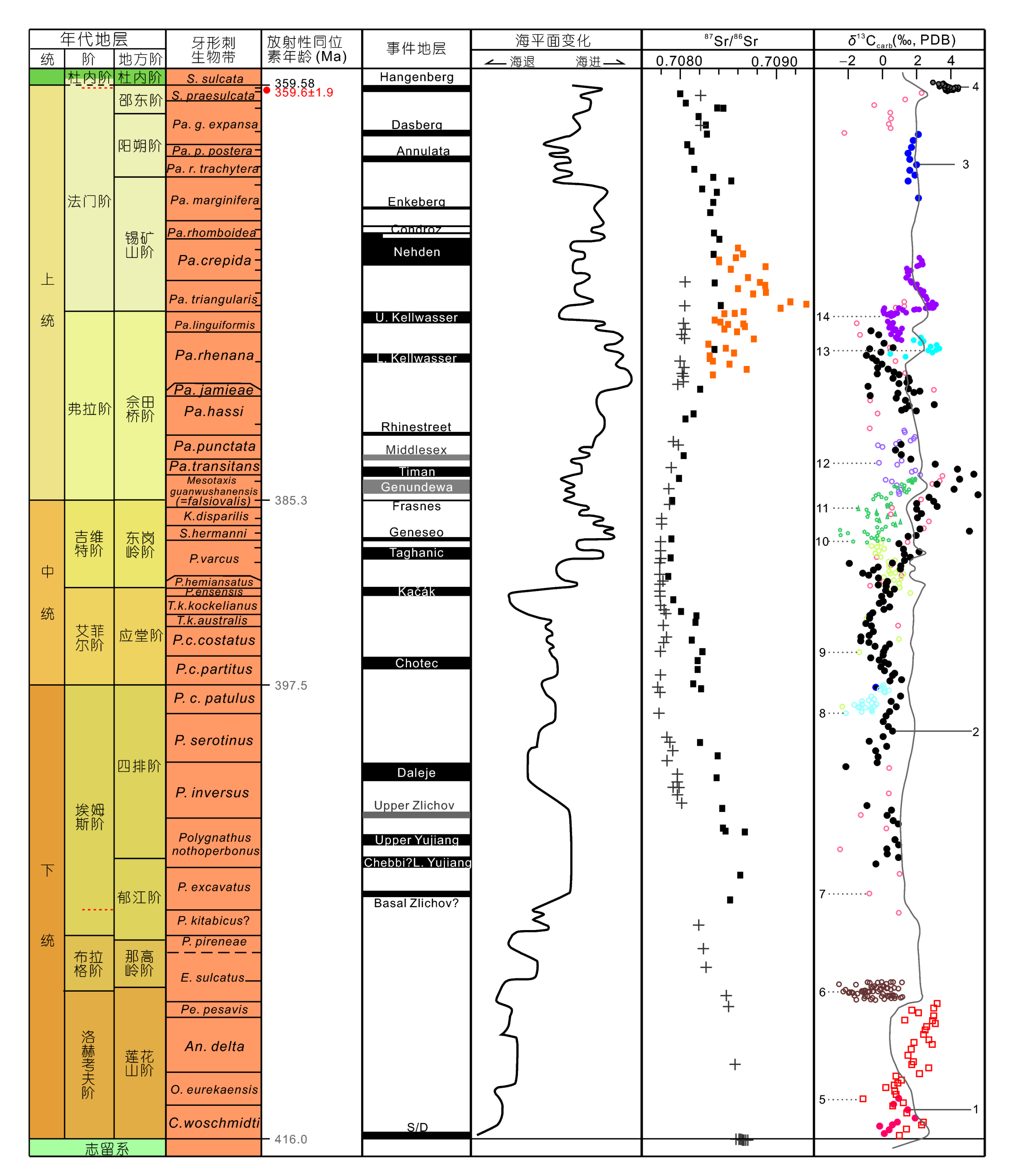


图 3　中国泥盆纪事件地层、锶同位素地层和碳同位素地层对比表

华南地区放射性同位素地质年龄据Liu等(2012), 相对海平面变化据Ma等(2009). 国际标准锶同位素值(十字)和华南锶同位素值(黑色实心和橙色实心矩形)分别据GTS2012, 黄思静(1997)和Chen等(2005). 碳同位素记录分别来自: 1, 保山大海坝; 2, 四川龙门山; 3, 桂林铁山; 4, 独山其林寨(Qie等, 2015); 5, 三江地区 (Ma等, 2017a); 6, 南宁大沙田; 7, 四川龙门山剖面(崔秉荃等, 1993); 8, 象州马鞍山(王传尚等, 2014); 9, 横县六景(刘疆和白志强, 2009); 10, 象州马鞍山(王大锐和白志强, 2002); 11, 象州巴漆(王大锐和白志强, 2002); 12, 桂林龙门(Ma等, 2008); 13、14, 桂林付合(Xu等, 2012; Chen等, 2013). 欧美地区泥盆纪碳同位素值平均曲线(浅灰色)据Buggisch和Joachimski (2006).

盆系底界附近贝刺类Icriodontids早期分子开始辐射，出现了许多与*C. woschmidti*相似的分子，而标准*C. woschmidti*的首现位于*C. postwoschmidti*之上，远高于志留系-泥盆系界线．中国各剖面中的“*C. woschmidti*”能否作为泥盆系底界的识别标志以及中国的第一个牙形刺生物带是否应保留有待进一步的分类学研究．

下泥盆统洛赫考夫阶和布拉格阶牙形刺生物带主要依据欧洲布拉格和北美地区贝刺类Icriodontids (*Caudicriodus*、‘*Icriodus*’、‘*Pelekysgnathus*’、*Latericriodus*和大量的过渡类型)、小贝刺类Icriodellids (*Pedavis*)、窄颚齿刺类Spathognathodontids(*Ancyrodelloides*、*Lanea*和*Masaraella*)和始鄂刺类Eognathodontids(*Eognathodus*、*Gondwania*和*Pseudogondwania*)的演化序列而建立，由于泥盆纪早期全球海平面较低，牙形刺动物群的地方性特征显著，无法建立全球统一的分带方案(Murphy, 2005; Slavík等, 2012)．中国洛赫考夫阶牙形刺生物带一直以来缺少基准剖面的系统研究，仅依据内蒙古、新疆、滇西、四川和西藏等地零星发现的带化石而建立，需要进一步的完善(白顺良等, 1982; Wang和Ziegler, 1983; 夏凤生, 1997; 王平, 2006; 王成源等, 2009)(图1)．

布拉格阶底界GSSP以牙形刺*Eognathodus sulcatus*的首次出现为标志(Chlupác和Oliver, 1989)，然而由于分类学观点存在差异，以及不同地区出现的位置不同而难以应用．近年来，布拉格阶层型剖面上*Eognathodus*早期分子被修订为*E. irregularis*，其首现层位位于GSSP界线之下，而标准的*E. sulcatus*分子出现于布拉格阶中部，不应再作为布拉格阶底界的界线标志(Becker等, 2012)．中国布拉格阶牙形刺研究程度较低，完整的生物带序列至今没有建立，仅有零星报道．近年来，王成源等(2016)对广西南宁大沙田剖面那高岭组牙形刺动物群进行研究，识别出牙形刺*E. irregularis*、*E. nagaolingensis*、*E. sulcatus*和*Masaraella pandora*，认为其时代为布拉格早期，对应于北美的*E. irregularis-Gondwania profunda*带和欧洲的*E. sulcatus*带．另外，广西横县六景剖面那高岭组和郁江组石洲段下部产牙形刺*Polygnathus pireneae*、*P. sokolovi*、*E. sulcatus*、*E. nagaolingensis*和*E. kuangi*等，大致相当于欧洲的*E. kindlei*至*P. pireneae*带(Lu等, 2016)．

埃姆斯阶底界“金钉子”界线位置与界线定义目前正在修订中，这主要是由于乌兹别克斯坦Zinzilban层型剖面上*P. kitabicus*出现层位过低，导致传统意义上的布拉格阶被压缩了近2/3(Carls 等, 2008)．SDS拟将界线上移至 *P. excavatus* Carls & Gandl, 1969 首现层位附近，以尽可能地接近传统意义上德国莱茵相区Emsian底界，其中，牙形刺*P. excavatus* ssp. 114的首现是最有可能的新界线定义(Carls等, 2008)．近年来，Lu等(2016)和郭文(2017)对广西天等、南丹和横县等地的Emsian底界牙形刺生物地层进行了详细研究，结果表明那高岭组顶部属于布拉格阶*P. pireneae*带，华南地区尚未发现*P. kitabicus*，牙形刺*P. e. excavatus*和*P. e.* ssp. 114存在于益兰组和郁江组石洲段中部，但底界的精确位置在华南地区还未确定．

随着全球海平面的逐渐上升，埃姆斯期至法门期牙形类的分布和演化具有世界性的特点，全球范围内浮游相牙形刺生物地层格架可以精确对比．埃姆斯期-吉维特中期，牙形刺以*Polygnathus*和*Icriodus*为代表，生物带的划分则主要依据polygnathids类的演化序列．牙形刺*Polynathus pireneae*→*P. kitabicus*→*P. excavatus*→*P. perbonus*→*P. nothoperbonus*→*P. inversus*演化谱系的建立实现了埃姆斯阶的精细划分(Yolkin等, 1994)，中泥盆统艾菲尔阶和吉维特阶底界GSSPs分别以牙形刺*P. c. partitus*和*P. hemiansatus*的首次出现为标志(表1)．吉维特晚期至弗拉期，对应于泥盆纪剧烈的气候波动和多次生物和环境事件，出现了大量演化迅速且延限较短的牙形类，以*Ancyrognathus*、*Ancyrodella*、*Klapperina*、*Mesotaxis*和*Schmidtognathus*等为代表，上泥盆统弗拉阶底界即以牙形刺*Ancyrodella rotundiloba*早期分子的首次出现为标志 (表1)．F-F之交生物大灭绝事件后，中泥盆世的特征类群大量灭绝，法门早中期以palmatolepids类繁盛为特征；法门晚期Dasberg事件之后，*Palmatolepis*属种开始衰落，至泥盆系-石炭系界线附近全部消亡，而*Pseudopolygnathus*、*Siphonodella*、*Bispathodus*和*Protognathodus*开始出现，具有重要的生物地层意义．中国埃姆斯阶-吉维特阶牙形刺生物带主要依据广西横县六景、象州大乐和德保四红山剖面(白顺良等, 1982；王成源等，1989；Bai等, 1994; Lu等, 2016)；弗拉阶-法门阶生物带主要依据广西南丹罗富和宜山拉利剖面(钟铿等, 1992; Ji和Ziegler, 1993)．

广西桂林南边村剖面是全球泥盆系-石炭系界线辅助层型，界线GSSP位于法国La Serre剖面89层之底，

以牙形刺*S. praesulcata*-*S. sulcata*演化谱系中, *S. sulcata*的首次出现为标志(表1). 近年的研究表明, La Serre剖面并不是一条符合界线定义的层型剖面, *S. sulcata*的首现层位实际上位于84层之底, 代表了一次事件沉积而形成的岩性界面附近(Kaiser, 2005); 与此同时, 牙形刺*S. praesulcata*包含大量形态型, *S. praesulcata*-*S. sulcata*演化谱系关系尚不清楚(Kaiser和Corradini, 2011). ICS泥盆系-石炭系界线工作小组拟将界线下移, 可能的界线层位包括牙形刺*Pr. kockeli*带底界、石炭纪型生物辐射的开始、Hangenberg生物大灭绝事件结束和泥盆纪末海退事件结束等(Spalletta等, 2017). 中国泥盆系-石炭系界线附近沉积类型多样, 化石丰富, 牙形刺动物群研究程度较高, 通过牙形刺生物地层、碳同位素地层和事件地层综合研究, 在华南深水和浅水相区中均已限定了Hangenberg事件和当前定义下的泥盆系-石炭系界线层位(Qie等, 2015, 2016). 牙形刺*Protognathodus*动物群见于中国桂林南边村剖面、贵州长顺睦化剖面和大坡上剖面(侯鸿飞等, 1985; Yu, 1988; Ji等, 1989), 但是*Pr. meischneri*→*Pr. collinsoni*→*Pr. kockeli*完整的演化谱系还未精确识别, 尚需要进一步的研究.

3.1.2　笔石

早泥盆世笔石见于广西钦州、玉林, 滇西和西藏等地, 可延续至埃姆斯阶下部, 穆恩之等(1988)和汪啸风(1988)建立的笔石分带一直被广泛采用. Chen等(2015) 对钦州-玉林地区钦州组中的笔石动物群进行了系统的研究和修订, 共识别出3属14种. 在此基础上, 自下而上划分出*U. uniformis*、*U. praehercynicus*、*Neomonograptus falcarius*和*U. yukonensis*四个笔石生物带, 可以与布拉格地区进行对比. *U. uniformis*还可见于滇西施甸和西盟等地(汪啸风, 1988; Chen和Quan, 1992), 该带之底标志着中国志留系-泥盆系界线位置. *N. himalayensis*带由穆恩之和倪寓南(1975)所创, 见于藏南聂拉木地区凉泉组下部, 与竹节石*N. acuaria*共生, 对应于布拉格阶中下部(图1).

3.1.3　介形类

华南地区泥盆纪浮游介形类, 特别是恩托莫介类的生物地层序列已经基本完善, 共建立19个生物带4亚带, 在缺少牙形刺和菊石的深水相地层中起重要的划分和对比作用(王尚启, 2009). 其中, 下、中泥盆统恩托莫介类生物带共7个, 自下而上包括*Monosulcoentomozoe beijuntangensis* 带、*Trisulcoentomozoe trisulcata* 带、*Bisulcoentomozoe tuberculata* 带、*Richteria longisulcata* 带、*R. nayiensis* 带、*Bertillonella praeerecta* 带和*B. suberecta* 带, 是王尚启(1983, 1986)在广西玉林樟木和南丹罗富建立的延限带和部分延限带; 上泥盆统包括12个生物带和4亚带, 可以与欧洲(如德国莱茵地区, Groos-Uffenorde等, 2000)的介形类生物带进行精确对比, 在弗拉阶上部, 恩托莫介类生物带比牙形刺生物带提供了更高分辨率的地层划分依据(王尚启, 2009; 宋俊俊和龚一鸣, 2015)(图1). 此外, 王尚启和彭金兰(2005)依据华南及邻区中华豆石介亚科分子的地层分布和下垂“V”字型肌痕高度与闭壳肌痕高度的比值(th/ah)变化, 建立了浅水相区中华豆石介族生物地层序列, 共划分出11个组合, 基本上可以确定到阶/亚阶一级地层单位, 可用于华南及东南亚地区泥盆纪地层划分与对比.

3.1.4　腕足类

泥盆纪腕足动物群落的明显更替是华南浅水相区地层划分和对比的最主要依据, 中国区域年代地层单位, 如那高岭阶、郁江阶、应塘阶、佘田桥阶和锡矿山阶的单位层型定义均以这一时期广泛分布的腕足动物群落为标志(表1). 由于广西运动的影响, 洛赫考夫期华南地区主要为滨海相碎屑岩沉积, 腕足类发育较少, 仅在钦州深水相区发育*Spirigerina supramarginalis*群落, 以*Grayina*、*Vagrania*、*Macroplura*、*Isothris*和*Reticulatrypa*等为特征(侯鸿飞等, 1988). 布拉格阶-法门阶, 有关华南浅水相区腕足类生物地层, 前人已有许多研究(Hou, 1981; 谭正修, 1987; Ma等, 2009; 马学平和宗普, 2010; Hou等, 2017), 共识别出11个腕足类组合带/顶峰带, 自下而上包括*Orientospirifer nakaolingensis*带、*Rostrospirifer tonkinensis*-*Dicoelostrophia*带、*Howellella fecunda*-*Reticulariopsis ertangensis*带、*Trigonispirifer*-*Otospirifer*-*Euryspirifer*带、*Athyrisina*-*Yingtangella*-*Xenospirifer*带、*Stringocephalus*顶峰带、“*Leiorhynchus*”带、*Cyrtospirifer*带、*Yunnanella*-*Sinospirifer*带、*Nayunnella*-*Hunanospirifer*带和*Yanguania dushanensis*-*Trifidorostellum longhuiense*-*Plicochonetes ornatus*带(图2). 需要指出的是, 埃姆斯早期-

法门期华南地区的岩相和生物相均发生明显分异, 腕足类生态类型多样. 早泥盆世埃姆斯期, 对应于浅水台地相的*Howellella fecunda-Reticulariopsis ertangensis*组合, Guo等(2015)在南丹地区益兰组上部识别出有以小型具双腕螺结构的*Sinathyris*为优势类群的动物群; 对应于台地相的*Trigonispirifer-Otospirifer-Euryspirifer*组合带, 南丹深水相区发育以薄壳、体小为主的*Costanoplia-Plectodonta*群落(许汉奎, 1977、1979), 而*Zdimir*组合带则见于台地边缘相区(吴诒和颜成贤, 1980; 广西壮族自治区地质矿产局, 1985; 邝国敦等, 1989). 中泥盆世, 在较深水的过渡相区, 六景地区艾菲尔阶顶部发育以*Vallomyonia* (*Yujiangella*) *sinensis*, *Pentamerella nanningensis*, *Cyrtinoides guangxiensis* (=*Echiinocoelia guangxiensis* Sun)等为主的动物群, 吉维阶底部有*Stringocephalus-Changtangella*动物群 (孙元林, 1992; Bai等, 1994; 鲜思远, 1998; Baliński和Sun, 2016). 法门早期, 在远岸碳酸岩台地和台间盆地中发育有以*Dzieduszyckia*为特征的动物群(Nie等, 2016); 此外, 相当于中国阳朔阶的时代(大致相当于法门阶牙形刺*Pa. r. trachytera-Pa. p. postera*带), 整个华南地区腕足类稀少, 无法建立腕足类组合带(图2).

3.1.5 四射珊瑚

四射珊瑚和床板珊瑚是泥盆纪海相地层中的重要化石门类, 类型多样、数量丰富、演化迅速, 往往与层孔虫和藻类等生物一起构成复杂的生物礁生态系统(廖卫华, 2006). 华南泥盆纪珊瑚动物群经历了五次重要的更替事件(廖卫华, 2006, 2015): (1) 布拉格期最早出现的代表性四射珊瑚, 如*Chalcidophyllum*和*Eoglossophyllum*标志着志留纪型珊瑚群的消失和泥盆纪型珊瑚群的出现(王钰等, 1974); (2) 艾菲尔中期, 蜂巢珊瑚类(如*Favosites*、*Squameofavosites*和*Dictyofavosites*)、日射珊瑚类(如*Heliolites*)和一些从早泥盆世延续而来的珊瑚属种惨遭灭绝; (3) 吉维特晚期的更替事件导致泡沫型珊瑚如*Mesophyllum*、*Cystiphylloides*和*Calceola*等迅速消失; (4) 弗拉期-法门期之交生物大灭绝导致大多数泥盆纪型珊瑚灭绝, 法门期早-中期仅在湖南等地的个别地点中发现少量孑遗分子, 如*Smithiphyllum*; (5) 法门期晚期, 石炭纪型珊瑚开始大量出现, 以*Ceriphyllum*和*Cystophrentis*等地方性的属出现为特征.

Liao和Ruan(2003)对华南泥盆纪四射珊瑚分类和演化进行了系统总结并划分出14个四射珊瑚生物带(图2), 可用于区域地层划分与对比, 中国其他地区(如准噶尔和西藏等地)由于研究程度较低, 并未建立较完整的和有广泛对比意义的四射珊瑚生物地层序列. 华南泥盆系最下部的珊瑚生物带为布拉格阶*Chalcidophyllum-Eoglossophyllum*组合带; 埃姆斯阶包含5个组合带, 自下而上为*Xystriphlloides-Heterophaulactis*带、*Siphonophrentis-Stereolasma*带、*Lyrielasma-Xiangzhouphyllum*带、*Trapezophyllum*带和*Psydracophyllum-Leptoinophyllum*带; 艾菲尔阶对应于*Utaratuia-Breviseptophyllum*带; 吉维特阶包括*Dendrostella-Columnaria*带和*Endophyllum-Sunophyllum*带; 弗拉斯阶对应于*Sinodisphyllum*带和*Peneckiella-Pseudozaphrentis*带; 法门阶则包含*Smithiphyllum*带、*Ceriphyllum*和*Cystophrentis*带(图2).

3.1.6 孢粉

泥盆纪孢粉演化迅速并具高丰度的特征, 是实现陆相地层划分及海陆相地层对比最有用的生物化石. 然而, 孢粉化石的产出层位并不连续, 在地理上比较分散, 受植物古地理区系差异、植物分布的不等时性和分散性的影响, 很难在全球建立统一、连续和高分辨率的生物地层格架. 欧阳舒等(2017)系统研究和总结了中国华南、准噶尔、塔里木、秦岭和西藏地区50多个泥盆纪孢粉化石组合, 依托多门类生物地层格架, 初步实现了这些组合带的精细对比. 本文图2中的孢粉组合序列根据华南地区云南曲靖(NC、GC、VL和RCA)、广西六景(LP、RAS和VMC)、贵州独山(TA和DG)、湖北长阳(CD)和湖南锡矿山、界岭和新邵等地(LH-LN)的孢粉组合带而建立(高联达, 1990; 欧阳舒等, 2017)(图2). 泥盆纪末期, 对应于气候剧烈波动和植物的快速辐射, 孢粉组合提供了高分辨率的地层对比依据, 其中, *Retispora lepidophyta-Knoxisporites literatus*(LL)、*R. lepidophyta-Hymenozonotriletes explanatus*(LE)和*R. lepidophyta-Verrucosisporites nitidus*(LN)组合带可以在全球范围内得到广泛的识别(Becker等, 2012).

3.1.7 植物

近年来, 中国泥盆纪植物研究工作取得了重要进

展, 许多植物的系统分类和演化生物学特征得到了深入研究(Wang和Xu, 2005; Xue, 2009), 一些植物类群, 如传统的*Protolepidodendron*已被修订并开展了全球性的区域对比(Xu和Wang, 2008), 植物群的面貌(Hao和Xue, 2013; 徐洪河等, 2015)、古植物地理学(Xu等, 2014)甚至相关的年代地层学工作得以开展(Zheng等, 2016), 为相关地层学工作的开展奠定了基础.

中国泥盆纪植物群分为南方区和北方区两个不同的区系, 两个区系在植物群的面貌上存在较大的差异(Cai和Wang, 1995). 其中, 南方区研究程度较高, 识别出了若干泥盆纪植物群, 包括早泥盆世布拉格期坡松冲植物群(Hao和Xue, 2013), 布拉格晚期-埃姆斯早期徐家冲植物群(Wang等, 2002)、中泥盆世晚期西冲植物群(Wang等, 2007)和晚泥盆世晚期的五通植物群(王怿等, 2006)等. 中国产艾菲尔期植物化石地层较少, 有明确年代证据的仅限新疆塔城地区呼吉尔斯特组, 见*Serrulacaulis spineus*和*Planatophyton hujiersitense* (Xu等, 2011; Gerrienne等, 2014). 结合近年来研究进展, 本文确立了新的阶一级植物大化石对比表, 自下而上包括洛赫考夫阶*Zosterophyllum-Xitunia*组合、布拉格阶*Zosterophyllum-Yunia*组合、埃姆斯阶*Psilophyton-Hsüa*组合、艾菲尔阶*Serrulacaulis*组合、吉维特阶*Minarodendron-Leclercqia*组合、弗拉阶*Archaeopteris-Leptophleoum*组合和法门阶*Sublepidodendron-Shougangia-Hamatophyton*组合(图2).

3.2 泥盆纪碳同位素地层

欧美地区泥盆纪海相碳酸盐的δ^{13}C值标准曲线已由Buggisch和Joachimski (2006)和Saltzman和Thomas (2012)建立, 但是不同地区和不同剖面之间的δ^{13}C值变化趋势却存在一定差异. 在应用碳同位素记录进行高精度地层对比时, 要开展沉积环境和成岩作用分析, 并将碳同位素记录的变化趋势进行跨相、跨盆地和跨板块对比, 以确定其是否记录了区域或全球海洋的碳同位素组成变化.

志留系-泥盆系界线附近, 中国三江地区和滇西的δ^{13}C值表现出明显的正向偏移特征, 偏移幅度分别为1.4‰和2‰左右(图3). 这次明显的正向偏移可见于布拉格向斜、Carnic Alps和北美等广大地区, 峰值通常在3.8‰左右, 其中内华达剖面δ^{13}C极值可达5.8‰, 代表了泥盆纪碳同位素值最大的事件之一(Buggisch 和Joachimski, 2006; Saltzman和Thomas, 2012; Husson等, 2016). 洛赫考夫阶中部, δ^{13}C值快速下降到0.6‰左右, 之后震荡式上升, 至洛赫考夫阶顶部达3.2‰, 表现出第二次明显的正向偏移特征(图3). 三江地区洛赫考夫阶中部-上部的δ^{13}C值演化趋势与布拉格地区不尽相同, 与北美地区比较相似, 即在该阶中上部已开始明显升高, 而布拉格地区δ^{13}C值在洛赫考夫阶-布拉格阶界线附近才发生明显正向偏移(Buggisch和Joachimski, 2006)(图3).

中国布拉格阶碳同位素地层研究程度很低, 几近无报道. 最近对广西南宁大沙田剖面*E. sulcatus*带的碳同位素记录进行了详细研究, 结果显示δ^{13}C值位于–2.5~1‰之间, 且剧烈波动 (图3), 结合微量元素和沉积相分析, 认为该地区的布拉格阶碳同位素记录在成岩过程中受到淡水淋滤及其互层粉砂岩中有机质渗透交代的影响, 不具有远距离地层对比意义.

埃姆斯阶$\delta^{13}C_{carb}$的前期研究主要集中在四川龙门山、广西天等把荷和象州马鞍山剖面, 由于采样精度不高和缺少高分辨生物地层控制, 无法与欧洲等地的碳同位素记录曲线进行对比 (图3). 本文对龙门山剖面的δ^{13}C记录进行了研究, 揭示出华南地区埃姆斯阶$\delta^{13}C_{carb}$值主要位于–1~0.9‰之间, 在0上下波动, 整体而言要低于欧洲地区同期的$\delta^{13}C_{carb}$值(Buggisch和Joachimski, 2006)(图3). 华南、欧洲与北美埃姆斯期δ^{13}C值波动幅度较小, 基本保持稳定, 仅在埃姆斯阶上部表现出一个缓慢的上升过程(图3).

艾菲尔阶下部, 四川龙门山剖面δ^{13}C值表现为一个负偏过程, 自底部由1.2‰逐渐降低至–1.3‰, 之后缓慢上升, 在吉维特阶底界附近升高至0.7‰左右, 偏移幅度为2‰. 欧洲地区δ^{13}C值在1.5‰附近小幅度波动, 仅在艾菲尔阶-吉维特阶(E-G)界线附近表现出明显正向偏移特征, 偏移幅度~2‰. 德国和摩洛哥地区腕足壳方解石δ^{13}C值在艾菲尔阶内部则表现出正向偏移特征, 由0.5‰急剧上升至2.6‰, 之后又快速下降至1.1‰, 跨越在E-G界线, δ^{13}C值快速上升了2‰, 达到3‰的峰值. 艾菲尔期δ^{13}C在不同地区和不同测试样品中的演化趋势并不一致, 尚需要进一步的研究(Buggisch和Joachimski, 2006; van Gelden等, 2006), 但在E-G界线附近均发生了一次明显的正偏事件, 偏移幅度比较一致, 可能反映了一次全球性的碳循环异常事件.

华南地区吉维特阶碳同位素记录的前期研究相对

较多，集中在广西象州马鞍山、象州大乐、横县六景和四川龙门山剖面(崔秉荃等，1993；Bai等，1994；王大锐和白志强，2002)，δ^{13}C值位于–2~2.5‰之间. 由于不同剖面中δ^{13}C值域范围并不一致，且缺少精细的生物地层格架，演化趋势不明显. 本文研究表明，龙门山剖面吉维特期δ^{13}C值剧烈波动，在中期发生了一次明显的正向偏移事件，幅度大于3.5‰，可在欧洲地区得到很好的识别，可能对应于全球海平面的上升和吉维特期的Taghanic事件(Buggisch和Joachimski，2006；Becker等, 2012).

吉维特阶-弗拉阶界线附近，象州马鞍山和龙门山剖面的δ^{13}C值均表现出明显的正偏特征，偏移幅度分别为2.5‰和3‰ (图3)，其中龙门山剖面δ^{13}C峰值为5.6‰，代表了中国泥盆系海相碳酸盐碳同位素值的极大值. 这次正偏事件在法国、意大利、德国以及澳大利亚等地位于弗拉阶底部的中*M. falsiovalis*带附近，偏移幅度一般在2‰左右，峰值<4.4‰(Buggisch和Joachimski, 2006). 弗拉阶下部，δ^{13}C值剧烈波动，但是全球范围内尚缺少统一的演化模式; 弗拉阶上部，分别对应于下、上Kellwasser事件，δ^{13}C值均表现出明显的正向偏移特征，其值域范围(0.5~3.5‰)和偏移幅度(~3‰)在全球范围内都可以得到很好的对比(Joachimski等，2002；Stephens和Sumner，2003；Chen等，2005；Xu等，2012；Chang等, 2017)(图3).

弗拉阶-法门阶之交δ^{13}C值的升高过程在付合剖面和白沙剖面均持续到了中*Pa. triangularis*带底界附近，之后逐渐下降至1.1‰左右，下-中*Pa. crepida*带，付合剖面的δ^{13}C值表现出小幅度(~1‰)的正偏特征(Chen等, 2013; Chang等, 2017). 华南地区上*Pa. crepida*带-下*Pa. marginifera*带缺少碳同位素数据，而欧洲等地法门阶内部δ^{13}C值基本在1‰至2‰之间波动，无明显异常特征(Buggisch和Joachimski，2006). 桂林铁山剖面中*Pa. marginifera*带至下*Pa. g. expansa*带，δ^{13}C值保持稳定并与欧洲等地一致，在2‰附近波动(图3). 泥盆纪末期中*S. praesulcata*带，即Hangenberg生物灭绝事件层位，华南地区δ^{13}C值表现出负向偏移特征; 泥盆纪末期上*S. praesulcata*带，伴随着海平面的上升和气温的升高，δ^{13}C值表现出一次明显正偏事件(Qie等，2015). 然而，不同沉积相区中δ^{13}C峰值和偏移幅度明显不同，近岸浅水台地相区其林寨剖面δ^{13}C值偏移较大，偏移量>4‰，极值可达4.5‰，深水盆地相区格董关剖面δ^{13}C值在2‰附近波动，华南地区D-C界线附近碳同位素组成的时空分布特征可以在法比盆地和Carnic Alps地区得到证实，具有全球对比意义(Qie等，2015).

3.3 锶同位素地层

由于锶在海水中的滞留时间(~10^6a)远大于海水的混合时间(~10^3a)，在任何给定的地质时间内全球海水中的锶同位素组成应是均一的，从而导致海水的锶同位素值是地质时间的函数，^{87}Sr/^{86}Sr值的变化可以用来进行精确的地层对比和测年(McArthur等, 2012). 黄思静(1997)对四川龙门山泥盆系剖面埃姆斯阶-法门阶上部海相碳酸盐的锶同位素进行了详细研究，结果表明^{87}Sr/^{86}Sr值域范围位于0.70788~0.70868之间, 其长期演化趋势与国际标准LOWESS拟合曲线基本一致，早泥盆世开始^{87}Sr/^{86}Sr比值逐渐下降, 至中泥盆世达到最低值并保持稳定, 晚泥盆世开始^{87}Sr/^{86}Sr比值逐渐升高(图3). 然而，由于国际标准曲线下泥盆统洛赫考夫阶至埃姆斯阶下部的数据点分辨率较低，而法门阶上部基本无数据报道，导致中国锶同位素曲线无法与其进行高精度对比. 埃姆斯期-艾菲尔晚期和弗拉晚期，龙门山地区的^{87}Sr/^{86}Sr比值明显高于国际标准LOWESS拟合曲线值(图3)，可能反映了区域性地质事件的影响(黄思静等，2002). Chen等(2005)对广西桂林付合剖面和白沙剖面F-F界线附近的锶同位素进行了高精度研究(图3)，^{87}Sr/^{86}Sr比值分布于0.7082~0.7094之间，在下、上Kellwasser层位发生了两次明显的升高事件, 对应于无机碳和有机碳同位素值的明显正偏，认为可能反映了这时期陆源风化作用的增强和初级生产力的提高导致了有机碳的大量埋藏和全球气候的变冷，并最终导致了F-F生物大灭绝事件. 然而，付合剖面和白沙剖面的^{87}Sr/^{86}Sr比值波动剧烈，且异常高于国际标准LOWESS拟合曲线值，是否受到了成岩蚀变、区域地质事件亦或是局限水体的影响需要进一步的研究.

3.4 中国泥盆纪事件地层

泥盆纪发生了多达25次的全球性海平面升降、海洋缺氧/贫氧和生物灭绝/更替事件(Becker等, 2012), 均可能与米兰科维奇旋回控制的气候波动密切相关，具有等时性和'瞬时性'特点. 例如，F-F之交生物大灭绝主幕的持续时间约为200~400kyr(Upper Kellwasser层,

De Vleeschouwer等, 2013; Huang和Gong, 2016), 而泥盆纪末Hangenberg生物大灭绝主幕的持续时间仅为50~100kyr(中*S. praesulcata*带, Myrow等, 2013), 这些事件在地层序列中的精确识别可以极大程度地提高泥盆纪地层的对比精度. 有关泥盆纪事件在华南地区的响应, Ma等(2014)已进行了简要概述, 本文对其中显著的生物事件和环境事件进行详细介绍.

3.4.1　志留系-泥盆系界线(S/D)事件

S/D事件主要表现为Transgrediensis生物灭绝事件之后的复苏过程, 以泥盆纪型生物, 如笔石*U. uniformis*、*U. subhercynicus*、*Neomonograptus aequabilis*和牙形刺*Caudicriodus*类群在全球范围内同时大量出现为特征, 并伴随着碳同位素值的明显正偏(Buggisch和Joachimski, 2006; Manda和Frýda, 2010). Zhao等(2011, 2015)在中国西秦岭普通沟和羊路沟剖面、云南曲靖西山村剖面以及钦防地区玉林长湾塘剖面S/D界线附近均识别出了有机碳同位素值的正偏事件, 结合牙形刺、微体脊椎化石和笔石序列研究成果, 精确限定了华南及邻区S/D界线位置和事件层位.

3.4.2　埃姆斯早期Basal Zlichov、Chebbi和郁江事件

在埃姆斯阶之下, 华南地区泥盆系以陆表海碎屑岩沉积为主, 仅有零星的灰岩出露, 从*P. excavatus*带开始, 华南地区广泛发育碳酸盐岩沉积, 而且出现层位具有向北升高的趋势, 体现了海侵超覆现象. 郭文(2017)在南丹莫德剖面益兰组上部和天等坡元剖面郁江组/黄猄组岩性界面之上的灰岩中均识别出牙形刺*P. e.* ssp. 114, 表明埃姆斯早期的快速海侵发生在*P. excavatus*带上部, 可能对应于欧非地区的Basal Zlichov事件(Garcia-Alcalde, 1997; Becker和Aboussalam, 2011).

Chebbi事件命名源自摩洛哥Ouidane Chebbi 附近的*Metabactrites-Erbenoceras*页岩, 位于牙形刺*P. excavatus*带顶部(=GTS2012 *P. gronbergi*带上部), 以世界范围内菊石类的首次辐射为特征, 代表了游泳动物演化史上的重大事件之一(Becker和Aboussalam, 2011). 中国最早的菊石类出现在南丹罗富竹节石*N. praecursor*带(=牙形刺*P. nothoperbonus*带下部), 主要包括*Anetoceras*、*Erbenoceras*和*Teicherticeras*等(钟铿等, 1992; Liao和Ruan, 2003), 与Chebbi事件的发生层位十分接近.

郁江事件由Yu等(2018)正式提出, 用以反映华南板块区域性的生物和环境事件, 分为两个阶段: 第一阶段发生在牙形刺*P. nothoperbonus*带底部, 对应于一次快速海侵事件, 主要影响浅水相区, 以岩性突变、底栖造礁珊瑚*Xystriphylloides*灭绝、珊瑚生物层的消失和"东京石燕动物群"群落结构的明显变化为特征; 第二阶段发生在*P. nothoperbonus*带的上部, 对应于*P. nothoperbonus*带内的第二次海侵事件, 以"东京石燕动物群"特征分子的完全消亡为标志. 郁江事件之后, 华南地区沉积分异明显, 根据岩相和生物相特征, 可以识别出曲靖型(海陆过渡相)、象州型(底栖相)、南丹型(浮游相)和过渡型等四种类型(侯鸿飞等, 1988)(图4).

华南地区*P. nothoperbonus*带底部的海侵事件导致了浅海生态系统中底栖生物群落的灭绝和更替(下郁江事件), 而同期较深水的南丹罗富地区则以菊石类的开始出现和辐射为特征, 可能反映了chebbi事件在不同板块和不同沉积相区中的差异响应.

3.4.3　艾菲尔期Choteč和Kačák事件

Choteč事件代表了一次全球海平面上升和海洋缺氧/贫氧事件, 发生在中泥盆统底界附近(*P. c. partitus*带上部), 以有机质的大量埋藏和海洋中主要生物类群的明显更替为特征(Walliser, 1996). 华南浮游相区, 该事件对应于坡折落组顶部的深黑色泥质灰岩、硅质岩和硅质泥岩沉积; 浅水台地相区, 对应于大乐组/古琶组岩性界线, 以竹节石*N. sulcata*、腕足类*X. fongi-E. lachrymosa*组合和珊瑚类*Utaratuia-Breviseptophyllum*组合的出现为特征, 标志着中国应堂期的开始(表1).

Kačák事件(亦称为*otomari*事件), 代表了一次黑色页岩沉积事件, 在欧洲E-G界线之下广泛分布, 反映了全球海平面的上升、有机碳的大量埋藏和海洋缺氧, 主要影响浮游生物, 如牙形类、头足类和珠胚类竹节石等(Walliser, 1996; Konigshof等, 2016). 华南南丹型深水相区, 以竹节石*N. otomari*的出现为标志; 过渡型相区以那叫组白云岩和民塘组底部的白云质灰岩向上转变为富含薄壳型竹节石的薄板状灰岩为特征, 竹节石*N. otomari*和腕足*Stringocephalus*几乎同时出现(Bai等, 1994; Sun和Bai, 1995; Sun和Boucot, 1999); 浅水台地相区, 龙门山剖面$\delta^{13}C$值在E-G界线附近升高了2‰左右, 是Kačák事件良好的识别标志(图4).

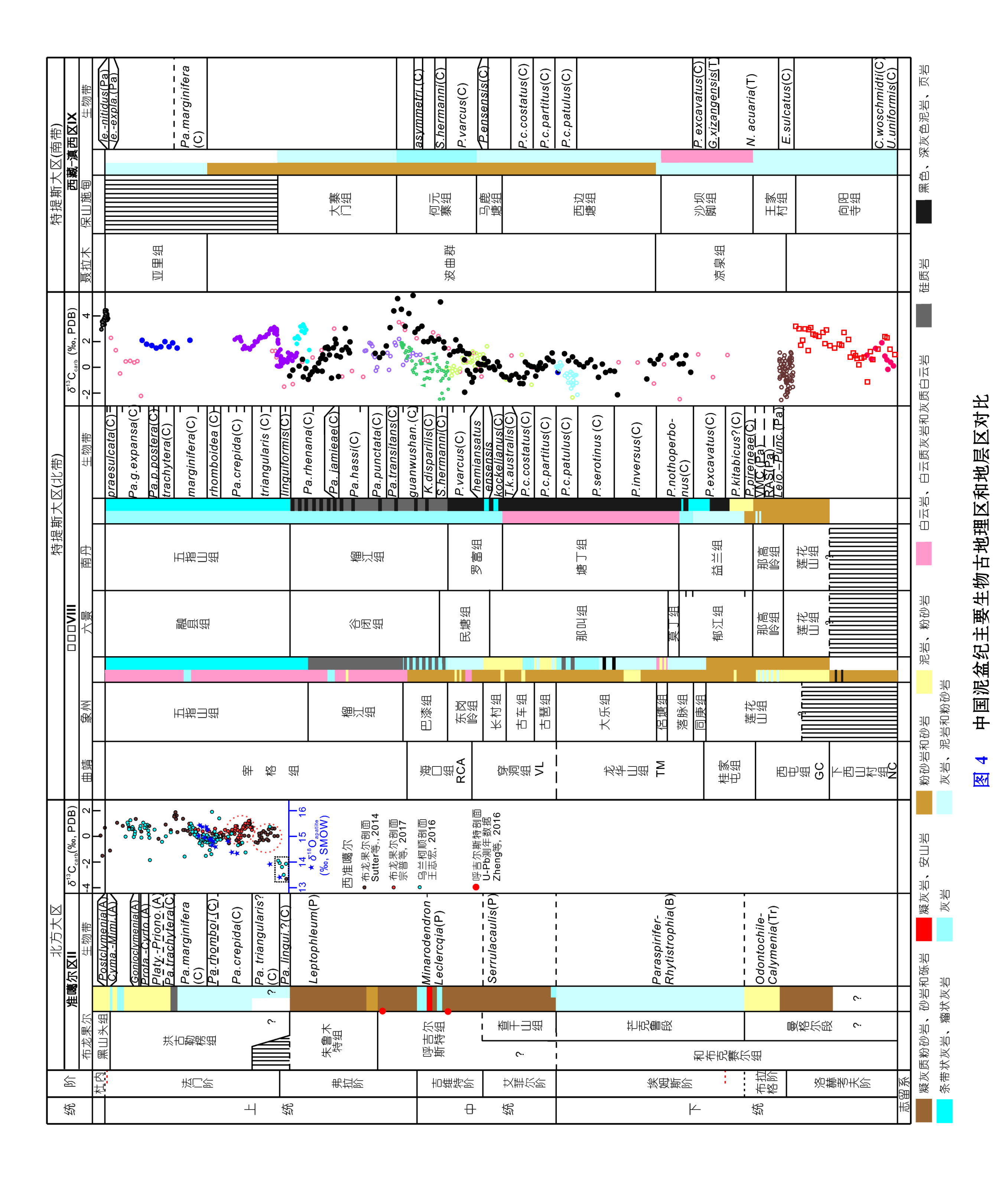


图 4 中国泥盆纪主要生物古地理区和地层区对比

3.4.4 吉维特期Taghanic和Frasne事件

Taghanic事件是泥盆纪最重要的地质事件和生物灭绝事件之一, 发生在中*P. varcus*带上部至上*Schmidtognathus hermanni*带, 随着全球海平面的逐渐上升, 生物古地理区系障壁被打破, 大量入侵物种的侵入导致吉维特期生物的大量消失和生物多样性的显著降低(House, 2002; McGhee等, 2013). 自下*P. varcus*带开始, 华南地区裂谷作用明显增强, 区域构造运动对相对海平面变化产生了一定影响, 但其演化趋势与全球海平面变化基本一致(Ma等, 2009)(图3). 该事件导致华南浮游相区菊石动物群落的明显更替, *Pharciceras*动物群取代*Maenioceras*动物群; 浅水台地相区, 以腕足类*Stringocephalus*的大量消亡和四射珊瑚*Endophyllum-Sunophyllum*组合中大多数分子的灭绝为特征; 在过渡相区(如六景等地)和部分浅水台地相区(如象州等地), 出现了相对较深水型的沉积(如谷闭组、巴漆组)(图4).

Frasne事件发生在弗拉阶底界附近, 在欧美地区表现为海侵事件和生物群落的明显更替(House, 2002); 在华南地区则表现为海退事件, 湘中和广西北部的部分地区缺失弗拉阶底部地层, 含弓石燕类地层(弗拉阶中部)直接覆盖在中泥盆统地层之上(马学平和宗普, 2010). 该事件导致华南地区造礁珊瑚和层孔虫的大量消失, 微生物礁丘和层孔虫生物层开始占据优势地位, 逐渐取代吉维特期大范围分布的层孔虫-珊瑚生物礁(吴义布等, 2010); 与此同时, $\delta^{13}C_{carb}$值发生明显的正向偏移, 偏移幅度为2.5~3‰左右, 反映出泥盆纪后生动物生物礁系统崩溃的开始和海洋碳循环异常, 对应于G-F界线附近的Frasne事件.

3.4.5 F-F生物大灭绝事件

F-F生物大灭绝是显生宙以来最大的五次生物灭绝事件之一(Sepkoski, 1996; McGhee等, 2013), 导致了海洋生物多样性的显著降低、生物群落结构的明显变化和史上最大生物礁生态系统的毁灭 (Copper, 1994; Walliser, 1996). 该事件具两幕式特征, 分别对应于下、上Kellwasser事件, 与全球气候变化、海平面升降和海洋氧化还原条件异常波动密切相关(Joachimski等, 2009).

下Kellwasser事件发生在上*Pa. rhenana*带下部, 华南地区研究程度较低, 特征不明显, 主要表现为过渡相和深水盆地相区中(桂林付合、垌村、白沙和武宣南峒剖面)碳、氧和锶同位素记录的明显偏移, 揭示出这一时期有机碳埋藏量的增加、全球气候的变冷和陆源输入量的增高 (Chen等, 2005; Xu等, 2012; 黄程, 2015).

上Kellwasser事件发生在*Pa. linguiformis*-下*Pa. triangularis*带期间, 代表了F-F之交生物大灭绝事件主幕, 主要影响浅海生态系统中的底栖生物类型, 如腕足类、珊瑚类和底栖介形类等(陈秀琴和马学平, 2004; 廖卫华, 2004; 王尚启, 2004), 但是不同门类和类群生物的灭绝过程和模式存在一定差异(Ma等, 2016). 深水相区, 牙形刺灭绝事件的持续时间可能小于20kyr, 以弗拉期palmatolepids类、ancyrodellids类和polygnathids类的灭绝为特征(Huang和Gong, 2016). 华南地区碳、氧、硫和锶同位素记录波动明显, 基本上揭示了这一关键转折期全球海洋地球化学循环的异常特征(Chen等, 2013; 黄程, 2015).

3.4.6 Hangenberg事件

泥盆纪末的Hangenberg事件发生在牙形刺中*S. praesulcata*带至上*S. praesulcata*带期间, 持续了大约100~300kyr(Myrow等, 2013), 最近的研究表明这次事件对海洋生态系统的影响至少与晚泥盆世F-F之交生物大灭绝相当, 代表了显生宙以来最大的生物灭绝事件之一(Becker等, 2012; Kaiser等, 2016). 华南的情况基本反映了全球Hangenberg事件的主要特征, 包括: 1) 灭绝主幕发生在中*S. praesulcata*带, 深水相区以黑色页岩的广泛分布为特征, 浅水相区则往往表现为沉积间断和岩性突变, 揭示出全球海平面的降低(Qie等, 2015); 2) 海洋生物受创明显, 古生代层孔虫类、几丁虫类、盾皮鱼类、介形类豆石介目和牙形刺掌鳞刺类全部灭绝, 菊石类仅有海神石的个别属种穿越灭绝主幕, 泥盆纪珊瑚、三叶虫、疑源类、有孔虫和脊椎动物大量消失, 打断了晚泥盆世F-F生物灭绝事件之后海洋生物的复苏过程; 3) 牙形刺上*S. praesulcata*带, 对应于南方冈瓦纳大陆冰期结束之后的海侵沉积, 幸存物种最终消亡, 陆地植物群发生明显更替, 石炭纪型生物开始出现; 4) 海洋中碳氮同位素记录波动明显, 揭示出该时期全球海洋地球化学循环异常(Liu等, 2016).

3.5 旋回地层与地质年龄

旋回地层在进行高分辨率地层划分与对比, 以及

建立高分辨率年代地层格架方面拥有巨大潜力. 对于新生代地层, 通过识别沉积记录中的米兰科维奇旋回并进行天文调谐, 已建立连续的、高分辨率(20~100kyr)天文年代标尺(ATS, Hinnov, 2004). 对于古生代地层而言, 米兰科维奇旋回提供时间分辨率为400kyr的浮动天文年代标尺, 结合放射性同位素年龄, 可以精确确定生物事件与气候环境事件的持续时间和发生年代, 进一步优化建立在生物地层学基础上的地质年代表(De Vleeschouwer等, 2012, 2013; Da Silva等, 2016).

中国泥盆纪旋回地层研究工作开展较早, Bai等(1994)和Bai(1995)认为华南泥盆纪地层中周期为100kyr的化学元素丰度和比值波动旋回反映了轨道偏心率旋回, 在此基础上计算出泥盆纪单个牙形刺带的持续年限在0.05~1.0Ma之间, 而弗拉期的延续时间为5Ma. 龚一鸣等(2004)对广西吉维特晚期-法门早期盆地相和斜坡相剖面开展旋回地层学研究, 通过野外观察岩性旋回识别出纹层、层束、层束组和超层束组4个级别的旋回排列组合样式, 认为其分别受米兰科维奇旋回(8~10ka)、岁差或斜度旋回(1.67ka或3.33ka)、偏心率旋回(100ka)和长偏心率(400ka)旋回控制, 实现了弗拉阶至法门阶下部12个标准牙形刺带的数字定年, 并认为弗拉阶的时间延续为4.3Ma. 然而需要注意的是, GTS2012中的弗拉期延续时间为9.5Ma, 表明中国泥盆纪旋回地层学研究得出的年龄值有较大差异, 尚需要进一步的工作. 为检验古气候旋回指标所反映的轨道周期的正确性, 需要采用时间序列分析、跨区域和跨板块旋回层的划分对比和高精度同位素年代测定来进行验证.

中国泥盆纪同位素年代学的研究极为薄弱, 与年代地层界线相关的研究工作仅见于华南地区泥盆系-石炭系界线附近. Liu等(2012)对贵州长顺大坡上剖面Hangenberg生物灭绝层位获取的锆石进行了SHRIMP锆石U-Pb测年, 获得了20个相对一致的年龄数据, 其谐和年龄为(359.6±1.9)Ma, 结合之前生物地层和层序地层的研究成果, 估算出华南地区泥盆系-石炭系界线年龄为359.58Ma, 并被《中国地层表》(2014)所采用(图3).

4 中国主要地层区对比

根据板块古地理格局、沉积盆地大地构造性质和古生物组合特征, 中国泥盆系可划分为9个地层区(图5), 包括阿尔泰-兴安地层区(I)、准噶尔地层区(II)、塔里木地层区(III)、华北地层区(IV)、祁连山-昆仑地层区(V)、秦岭地层区(VI)、羌塘-三江地层区(VII) 、华南地层区(VIII)和喜马拉雅-滇西地层区 (IX). 中国不同地层区之间地层对比的主要依据是生物地层, 特别是浮游相生物, 如牙形刺、笔石和竹节石, 而跨区地层对比的不确定之处, 主要在于其他地区生物地层资料不够充分以及生物古地理区系的影响, 无法与华南地区标准序列进行精细对比(图4).

泥盆纪气候剧烈波动、海平面频繁升降, 海洋生物群呈现出明显的古生物地理区系分异, 赵锡文(1988)参照构造古地理格局、古气候分带和泥盆纪海洋生物群的特点, 将泥盆纪古海洋划分为北方大区、特提斯大区(包括北带和南带)和南半球的玛尔维诺卡弗列克大区. 中国各个板块位于原特提斯洋和古特提斯洋的南北两端, 随着古特提斯洋的逐渐打开, 总体上向北缓慢漂移. 其中, 阿尔泰-兴安区隶属于西伯利亚板块南缘, 准噶尔区属于哈萨克斯坦板块东部, 地处活动陆缘和大洋中的岛弧带, 主要发育陆相碎屑岩、浅海陆源碎屑岩、碳酸盐岩, 半深海复理石和火山沉积建造. 阿尔泰-兴安区和准噶尔区的生物古地理区系均属于北方大区, 生物化石以底栖生物为主, 浮游生物较少, 生物群落组合类型与西伯利亚和哈萨克斯坦相近. 早泥盆世, 准噶尔区三叶虫以*Odontochile*类为代表, 腕足类*Leptaenopyxis*和*Paraspirifer*等大量发育, 四射珊瑚整体发育情况较差, 仅在和布克赛尔组芒克鲁段中见大量珊瑚化石, 且与华南地区生物类型完全不同(廖卫华和蔡土赐, 1987; 侯鸿飞等, 1988); 东部的内蒙古和兴安地区四射珊瑚较为发育, 重要的属种有*Siphonophrentis*和*Schlotheimophyllum*等, 以小型单体、鳞板带不发育和边缘厚结带显著为特征, 很可能代表了温带气候. 由于缺少浮游相生物地层的系统研究, 北方大区洛赫考夫、布拉格和埃姆斯阶底界的精确位置至今无法确定. 依据lycopsid类植物组合特征, 准噶尔区呼吉尔斯特组一直以来被认为属于中泥盆统艾菲尔阶上部-吉维特阶, 但是由于缺少具有指向意义的化石记录, 其持续时间一直存在争议; 与此同时, 由于盆地内的地层多呈断块状分布, 其与下伏地层, 如和布克赛尔组和查干山组(或和丰组)的接触关系亦存在较大争议(肖世禄等, 1991; 汪啸风等, 2004)(图4). 最

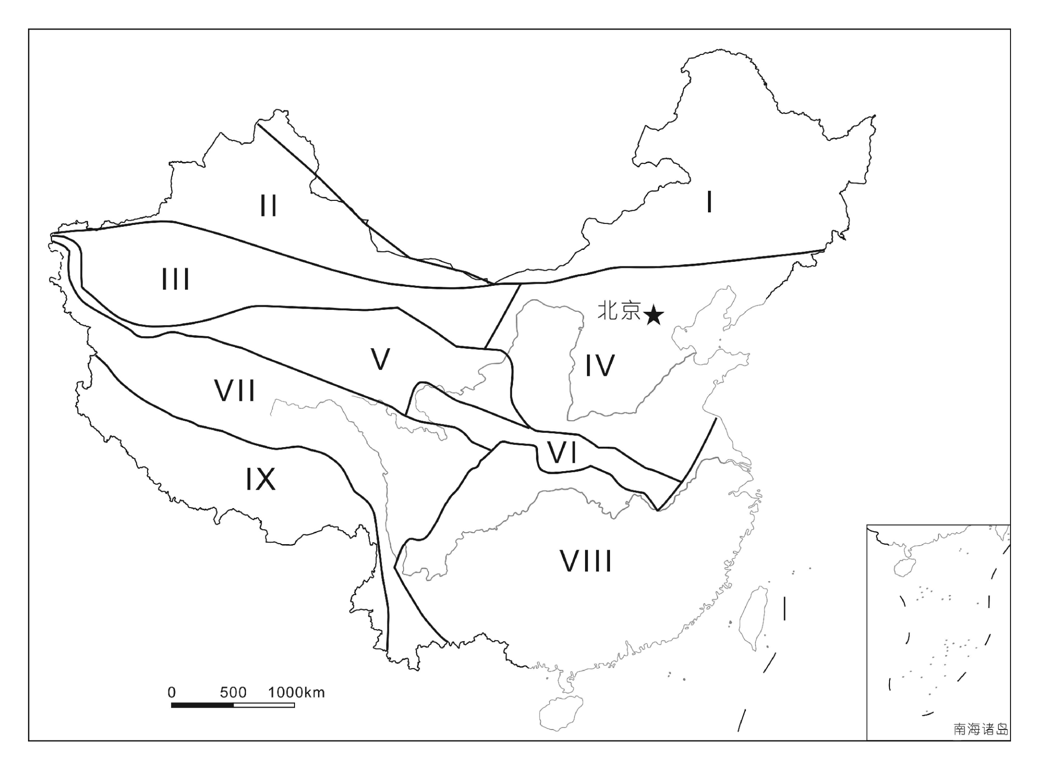


图 5 中国泥盆系构造-地层分区

I. 阿尔泰-兴安地层区; II. 准噶尔地层区; III. 塔里木地层区; IV. 华北地层区; V. 祁连山-昆仑地层区; VI. 秦岭地层区; VII. 羌塘-三江地层区; VIII. 华南地层区; IX. 喜马拉雅-滇西地层区

近, Xu等(2014)在呼吉尔斯特组上段产植物*Serrulacaulis*的层位中识别出孢子*Acinosporites lindlarensis*和*Rotaspora* sp., 认为其属于埃姆斯阶上部-艾菲尔阶, Zheng等(2016)对呼吉尔斯特组上部的碎屑锆石开展ICP-MS锆石U-Pb测年, 结果显示该组上部地层的形成年龄不老于380Ma, 可延续至弗拉早期(图4). 近年来, 国内外学者对法门阶洪古勒楞组开展了系统的岩石地层、多门类(包括牙形刺、菊石类和腕足类)生物地层、碳同位素地层和事件地层研究, 建立了高精度的综合地层格架(Suttner等, 2014; Carmichael等, 2014, 2016; Zong等, 2015, 2016; 王志宏, 2016; Ma等, 2017b; 宗普等, 2017)(图4), 然而关于弗拉阶-法门阶和泥盆系-石炭系的界线位置, 还存在一定争议. Suttner等(2014)和王志宏(2016)结合牙形刺生物地层研究成果, 认为洪古勒楞组底部δ^{13}C值的正向偏移(幅度>3‰)对应于法门阶底界全球碳同位素值的明显正偏, 揭示出F-F界线存在于洪古勒楞组底部; 宗普等(2017)则认为西准噶尔地区未见标准弗拉期牙形刺分子, 洪古勒楞组底部δ^{13}C值的大幅度偏移特征主要受成岩蚀变作用的影响, 其真实演化趋势与法门阶*Pa. crepida*带-*Pa. rhomboidea*带全球碳同位素值曲线一致, 表明洪古勒楞组底部可能缺失弗拉阶和法门阶底部地层(图4). Carmichael等(2016)通过岩石学、微量元素和稳定同位素地球化学综合研究, 在黑山头组下部(相当于国内学者划分的洪古勒楞组上部)识别出一次海洋缺氧事件, 认为其可能对应于泥盆纪末Hangenberg事件, 而Zong等(2016)则认为Hangenberg灭绝事件发生在黑山头组底界附近, 以腕足类*Syringothyris*-*Spirifer*组合取代*Austrospirifer*? sp.组合为标志. 西准噶尔区, F-F界线、Hangenberg事件层位及泥盆系-石炭系界线的精确位置还有待进一步的确认.

泥盆纪喜马拉雅-滇西地层区主体位于印度板块北缘, 属于被动大陆边缘浅水陆棚区, 以陆源碎屑岩和碳酸盐岩沉积为主, 生物古地理区系属于特提斯大区南带(图4). 西藏珠峰地区凉泉组含笔石*N. himalayensis*、*U. thomasi*和竹节石*Nowakia acuaria*、*Guerichina xizangensis*等, 可以与华南玉林-钦州地区进行对比, 相当于布拉格阶至埃姆斯阶下部; 波曲群主要由中粗粒

石英砂岩组成, 研究程度较低, 无法进行详细划分和对比; 亚里组下部见孢粉组合LE和LN的标准分子, 表明泥盆系-石炭系界线位于亚里组下部的碎屑岩内部(图4). 滇西保山-施甸地区下泥盆统以浮游相生物为主, 向阳寺组中见笔石*U.* cf. *uniformis*和"*C. woschmidti*", 揭示出S-D界线可能位于向阳寺组底部附近; 王家村组、沙坝脚组和西边塘组含笔石、竹节石和牙形刺, 可以与华南地区标准序列进行对比, 其中下-中泥盆统界线位于西边塘组上部(图4); 中-上泥盆统含大量珊瑚类、腕足类和三叶虫等, 但生物组合内容与华南地区差别较大, 鸮头贝类等典型分子至今未被发现. 董致中和王伟(2006)对滇西地区泥盆系牙形刺进行了系统研究, 在马鹿塘组和何元寨组中建立起标准牙形刺生物地层序列, 实现了滇西地区中泥盆地层精细划分和对比, 并确定何元寨组顶部属于上泥盆统弗拉阶.

中国其余地层区的生物古地理分区均属于特提斯大区北带, 除华南地层区外, 生物地层和年代地层研究程度均较低. 泥盆纪塔里木板块、华北板块和祁连山-昆仑板块被认为拼接在一起, 其主体为古陆剥蚀区, 下、中泥盆统一般不发育, 上泥盆统主要为陆相红色砾岩、砂砾岩和砂岩沉积, 见植物、孢粉和鱼类化石; 海相地层主要见于塔里木板块北缘(南天山分区)和西南缘(铁克里克分区), 以被动陆缘混积台地沉积为主, 底栖生物组合类型与华南地区比较相似, 具有代表性的鸮头贝类广泛见于南天山分区托格买提组和萨尔阿明组. 依据孢粉组合特征, 塔里木盆地东河塘组和奇自拉夫组分别划归法门阶中部和法门阶(欧阳舒等, 2017), 而巴楚组泥盆系-石炭系界线位于下泥岩段内部(朱怀诚等, 2000). 秦岭区、羌塘-三江地层区生物群面貌与华南地区相近, 生物亲缘性较强, 如迭部地区和昌都地区的腕足类动物群基本上可以与华南地区进行逐一对比(侯鸿飞等, 1988). 秦岭迭部地区四射珊瑚和腕足类组合研究程度较高, 分别建立14个和17个组合带, 实现了地层的精细划分, 但是浮游相生物研究程度相对较低, 关键年代地层界线的精确识别还有待进一步加强. Zhao等(2011)通过对秦岭区普通沟剖面和羊路沟剖面开展详细的有机碳同位素分析, 在下普通沟组底界附近识别出正向偏移特征, 结合前人牙形刺动物群研究成果, 精确限定了志留系-泥盆系界线位置和S/D事件层位.

5 结论和存在问题

依托华南及邻区良好的生物地层、碳同位素地层和事件地层研究基础, 本文已建立起中国泥盆纪综合地层框架, 初步实现了不同沉积相区和不同板块之间地层的精确对比, 但是对于研究泥盆纪重大气候事件和生物事件的精细卡定还远远不够, 主要存在以下几方面的问题: (1) 天文旋回连续时间标尺的建立和高精度绝对年龄的测定等方面还仅仅处于起步阶段, 远未达到国际先进水平; (2) 中国地方性年代地层单位研究还停留在定义阶段, 尚缺少进一步详细划分和系统综合研究; (3) 中国泥盆纪氧同位素地层和硫同位素地层研究仅集中在弗拉阶-法门阶界线附近, 缺少连续而完整的同位素记录曲线; (4) 除华南地层区外, 中国其他地层区的泥盆纪综合地层研究程度较低, 有待进一步加强.

当前, 国际地层委员会泥盆纪分会的研究任务主要包括以下4个方面: (1) 埃姆斯阶底界GSSP的重新修订; (2) 泥盆系-石炭系界线GSSP的重新修订; (3) 泥盆系亚阶划分; (4) 深水相-浅水相地层对比和海陆相地层对比. 与此同时, IGCP 652(2017~2020)已于近期启动, 旨在通过生物地层、放射性同位素测年和旋回地层综合研究, 建立连续的、高分辨率天文年代标尺, 精细解读古生代沉积记录的地质年代. 中国泥盆纪研究具有得天独厚的条件, 华南南丹型相区沉积了自埃姆斯期以来连续的深水相沉积, 完整的保存了古气候波动旋回记录, 为建立泥盆纪高精度的天文年代标尺提供了天然的实验室; 华南过渡型和海陆交互相沉积分布广泛, 含丰富的化石记录, 是实现深水相-浅水相和海-陆相地层精确对比的桥梁和纽带, 对实现中国地方性年代地层单位与国际标准年代地层单位精确对比具有重要意义; 华南地区泥盆系-石炭系界线附近多门类精细生物地层、岩石地层、事件地层、碳氮稳定同位素地层和地质年龄的研究程度较高, 应为泥盆系-石炭系界线"金钉子"的修订作出中国应有的、关键性的贡献.

参考文献

白顺良, 金善燏, 宁宗善. 1982. 广西及邻区泥盆系生物地层. 北京: 北京大学出版社. 203

蔡重阳. 2000. 非海相泥盆系. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 中国地层研究二十年(1979~1999). 合肥: 中国科学技术大学出版社. 95–127
陈秀琴, 马学平. 2004. 华南晚泥盆世腕足动物的灭绝和复苏. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 主编. 生物大灭绝与复苏: 来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科技大学出版社. 317–356
崔秉荃, 卢武长, 杨绍全. 1993. 龙门山地区泥盆纪锶、碳同位素与海平面变化. 成都地质学院学报, 20: 1–8
董致中, 王伟. 2006. 云南牙形类动物群. 昆明: 云南科技出版社. 347
冯景兰. 1930. 两广的几个地层问题. 中国地质学会志, 9: 127–133
高联达. 1990. 湖南泥盆-石炭系界线层孢子组合及其地层意义. 地质论评, 36: 58–68
葛利普. 1931. 中国泥盆纪之腕足类. 中国古生物志, 乙种, 3号. 538
龚一鸣, 徐冉, 汤中道, 李保华. 2004. 广西上泥盆统轨道旋回地层与牙形石带的数字定年. 中国科学 D辑: 地球科学, 34: 635–643
广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志. 北京: 地质出版社. 1–853
郭文. 2017. 华南下泥盆统埃姆斯阶下部牙形石生物地层及腕足动物群演替. 博士学位论文. 北京: 北京大学. 1–114
侯鸿飞. 1978. 中国南部的泥盆系. 华南泥盆系会议论文集. 北京: 地质出版社. 214–231
侯鸿飞, 季强, 吴祥和, 熊剑飞, 王士涛, 高联达, 盛怀斌, 魏家庸, 苏珊特纳. 1985. 贵州睦化泥盆-石炭系界线. 北京: 地质出版社. 226
侯鸿飞, 马学平. 2005. 国际泥盆系GSSP与华南泥盆系划分. 地层学杂志, 29: 154–159
侯鸿飞, 王士涛等. 1988. 中国的泥盆系, 中国地层7. 北京: 地质出版社. 348
黄程. 2015. 华南泥盆纪F-F事件的特征与致因: 来自高分辨率牙形石生物地层及化学地层的证据. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学. 1–146
黄思静. 1997. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究. 地质学报, 71: 45–53
黄思静, 石和, 张荫, 武文慧, 沈立成. 2002. 龙门山泥盆纪锶同位素演化曲线的全球对比及海相地层的定年. 自然科学进展, 12: 945–951
邝国敦, 赵明特, 陶业斌. 1989. 中国海相泥盆系标准剖面——广西六景泥盆系剖面. 武汉: 中国地质大学出版社. 154
廖卫华. 2004. 华南晚泥盆世弗拉期-法门期之交大灭绝后珊瑚群的复苏. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 主编. 生物大灭绝与复苏: 来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科技大学出版社. 259–280
廖卫华. 2006. 华南泥盆纪四射珊瑚的多样性变化. 见: 戎嘉余等主编. 生物的起源、辐射与多样性演变——华夏化石记录的启示. 北京: 科学出版社. 417–428
廖卫华. 2015. 华南中泥盆世两次重要的珊瑚群更替事件. 古生物学报, 54: 305–315
廖卫华, 蔡土赐. 1987. 新疆北部泥盆纪四射珊瑚组合序列. 古生物学报, 26: 689–707
刘疆, 白志强. 2009. 广西横县六景中泥盆统Mg、Ca、Na、Sr、δ^{13}C和δ^{18}O化学地层学特征. 物探与化探, 33: 417–423
马学平, 宗普. 2010. 湖南中-晚泥盆世腕足动物组合、海平面升降及古地理演变. 中国科学: 地球科学, 40: 1204–1218
穆恩之, 陈旭, 倪寓南, 穆道成, 袁金良, 韦仁彦, 姚肇贵, 殷保安, 施文蛟, 张军达. 1988. 广西、玉林地区的志留系和泥盆系. 地层学杂志, 12: 241–254
穆恩之, 倪寓南. 1975. 珠穆朗玛峰地区志留纪及泥盆纪笔石. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告, 古生物第一分册. 科学出版社. 1–27
欧阳舒, 卢礼昌, 朱怀诚, 刘锋. 2017. 中国晚古生代孢粉化石. 合肥: 中国科技大学出版社. 1092
全国地层委员会, 中国地质调查局. 2014. 中国地层表. 北京: 地质出版社. 1
阮亦萍. 1979. 中国泥盆纪菊石的分带. 地层学杂志, 3: 134–137
阮亦萍, 穆道成. 1989. 广西泥盆纪竹节石. 中国科学院南京地质古生物所集刊, 26: 1–238
宋俊俊, 龚一鸣. 2015.古生代介形类的研究现状及展望. 古生物学报, 54: 404–424
孙元林. 1992. 广西六景剖面埃菲尔-吉维特阶界线层的腕足动物化石. 古生物学报, 31: 708–723
谭正修. 1987. 腕足类. 见: 湖南省地质矿产局区域地质调查队, 编著. 湖南晚泥盆世和早石炭世地层及古生物群. 北京: 地质出版社. 111–133
田奇瑰. 1938. 中国之泥盆纪. 地质论评, 13: 203–210
王成源. 1981. 四川若尔盖早泥盆世普通沟组的牙形刺. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (3): 77–84
王成源. 1989. 广西泥盆纪牙形刺. 中国科学院南京地质古生物所集刊, 25: 1–212
王成源. 2000. 泥盆系. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 中国地层研究二十年(1979–1999). 合肥: 中国科学技术大学出版社. 73–94
王成源. 2018. 中国泥盆纪牙形刺. 北京: 科学出版社
王成源, 陈波, 邝国敦. 2016. 广西南宁大沙田下泥盆统那高岭组的牙形刺. 微体古生物学报, 33: 420–435
王成源, 彭善池. 2017. 推进《国际年代地层表》在中国的应用. 地层学杂志, 41: 216–220
王成源, 王平, 杨光华, 谢伟. 2009. 四川盐边稗子田志留系牙形刺生物地层的再研究. 地层学杂志, 33: 302–317
王传尚, 李志宏, 彭中勤, 王保忠, 张国涛. 2014. 黔桂地区早泥盆世晚期碳稳定同位素变化及其对海平面变化的响应. 中国地质, 41: 2039–2047
王大锐, 白志强. 2002. 广西中-上泥盆统界线附近的化学. 地层学杂志, 26: 50–54
王平. 2006. 内蒙古巴特敖包地区早泥盆世牙形刺. 微体古生物学报, 23: 199–234

王尚启. 1983. 广西南丹罗富晚泥盆世浮游介形类化石带. 科学通报, 4: 234–236
王尚启. 1986. 广西泥盆纪介形类Rhomboentomozoinae. 古生物学报, 25: 155–168
王尚启. 2004. 晚泥盆世介形类豆石目的大灭绝. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 主编. 生物大灭绝与复苏: 来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科技大学出版社. 357–366
王尚启. 2009. 中国介形类化石 (第三卷). 合肥: 中国科技大学出版社. 251
王尚启, 彭金兰. 2005. 泥盆纪介形类中华豆石介族的生物地层学意义. 中国科学 D辑: 地球科学, 35: 263–267
汪啸风. 1988. 笔石动物群. 见: 侯鸿飞, 王士涛等, 主编. 中国的泥盆系, 中国地层7. 北京: 地质出版社. 236–239
汪啸风, 陈孝红, 等. 2004. 中国各地质时代地层划分与对比. 北京: 地质出版社. 596
王怿, 郝守刚, 傅强, 徐洪河, 王德明. 2006. 中国志留-泥盆纪早期陆生维管植物多样性. 见: 戎嘉余, 主编. 生物的起源、辐射与多样性演变: 华夏化石记录的启示. 北京: 科学出版社. 383–398
王钰, 俞昌民, 王成源, 阮亦萍. 1981. 中国泥盆系各级界线的划分. 科学通报, 26: 230–232
王钰, 俞昌民. 1962. 中国的泥盆系. 全国地层会议学术报告汇编. 北京: 科学出版社. 140
王钰, 俞昌民, 吴岐. 1974. 中国南方泥盆纪生物地层研究的进展. 中国科学院南京地质古生物所集刊, 6号: 1–45
王志宏. 2016. 西准噶尔晚泥盆世牙形石生物地层及其碳氧同位素组成. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学. 1–137
吴诒, 颜成贤. 1980. 广西德保钦甲的下、中泥盆统. 地层学杂志, 4: 201–208
吴义布, 龚一鸣, 张立军, 冯启. 2010. 华南泥盆纪生物礁演化及其控制因素. 古地理学报, 12: 253–267
夏凤生. 1997. 新疆南天山东部阿尔皮什麦布拉克组的牙形类及其意义. 古生物学报, 36(增刊): 77–96
鲜思远. 1998. 广西六景中泥盆统民塘组底部的硅化腕足动物化石. 岩相古地理, 18: 28–47
肖世禄, 吴绍祖, 王宝瑜, 王书容, 侯鸿飞. 1991. 新疆西准噶尔沙尔布尔提山地区泥盆系研究新进展. 新疆地质科学, 3: 1–9
许汉奎. 1977. 广西南丹中泥盆世早期的褶无皱贝类(plicanoplids). 古生物学报, 16: 59–70
许汉奎. 1979. 广西南丹县泥盆纪塘乡组的腕足类. 古生物学报, 18: 362–380
徐洪河, 蒋青, 张小乐, 王怿, 傅强, 冯净. 2015. 新疆西准噶尔中泥盆世呼吉尔斯特植物群的特征、时代、古环境以及古植物地理学意义. 古生物学报, 54: 230–239
乐森璕. 1938. 中国南部海相中下(D1中部)及下中(D2下部)泥盆纪地层. 中国地质学会志, 18: 67–73
赵锡文. 1988. 泥盆纪. 见: 殷鸿福等, 主编. 中国古生物地理学. 武汉: 中国地质大学出版社. 134–150
钟铿, 吴诒, 殷保安, 梁演林, 姚肇贵, 彭金兰. 1992. 广西的泥盆系. 武汉: 中国地质大学出版社. 384
朱怀诚, 张师本, 罗辉, 高琴琴, 王启飞, 黄智斌, 唐鹏, 杜品德. 2000. 塔里木盆地泥盆系-石炭系界线研究新进展. 地层学杂志(增刊), 24: 371–372
宗普, 马学平, 张美琼, 张宇波, 吕丹. 2017. 新疆准噶尔与华南湘中法门期碳同位素特征的对比研究. 北京大学学报(自然科学版), 53: 843–861
Algeo T J, Berner R A, Maynard J B, Scheckler S E. 1995. Late Devonian oceanic anoxic events and biotic crises: “Rooted” in the Evolution of vascular land plants? GSA Today, 5: 64–66
Aretz M. 2010. Report of the Joint Devonian–Carboniferous Boundary GSSP Reappraisal Task Group. Newsl Carbonif Stratigr, 28: 26–30
Bai S L. 1995. Milankovitch cyclicity and time scale of the Middle and Upper Devonian. Int Geol Rev, 37: 1109–1114
Bai S L, Bai Z Q, Ma X P, Wang D R, Sun Y L. 1994. Devonian Events and Biostratigraphy of South China. Beijing: Peking University Press. 303
Baliński A, Sun Y L. 2016. Cyrtinoides Yudina and Rzhonsnitskaya, 1985, an aberrant Middle Devonian ambocoeliid brachiopod genus from China. Palaeoworld, 25: 632–638
Becker R T. 2009. SDS Annual Report to ICS 2008. Subcomm Devonian Stratigr Newsl, 24: 2–7
Becker R T, Aboussalam Z S. 2011. Emsian chronostratigraphy-preliminary new data and a review of the Tafilalt (SE Morocco). Subcomm Devonian Stratigr Newsl, 26: 33–43
Becker R T, Gradstein F M, Hammer O, 2012. The Devonian Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012, Volume 2. Amsterdam: Elsevier. 559–601
Buggisch W, Joachimski M M. 2006. Carbon isotope stratigraphy of the Devonian of Central and Southern Europe. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 240: 68–88
Cai C Y, Wang Y. 1995. Devonian floras. In: Li X X, ed. Fossil Floras of China Through the Geological Ages. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press. 28–77
Carls P, GandlA J. 1969. Stratigraphie und Conodonten des Unter-Devons der Östlichen Iberischen Ketten (NE-Spanien). Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen, 132: 155–218
Carls P, Slavík L, Valenzuela-Ríos J I. 2007. Revisions of conodont biostratigraphy across the Silurian-Devonian boundary. Bull Geosci, 82: 145–164
Carls P, Slavík L, Valenzuela-Ríos J I. 2008. Comments on the GSSP for the basal Emsian stage boundary: The need for its redefinition.

Bull Geosci, 83: 383–390
Carmichael S K, Waters J A, Batchelor C J, Coleman D M, Suttner T J, Kido E, Moore L M, Chadimová L. 2016. Climate instability and tipping points in the Late Devonian: Detection of the Hangenberg Event in an open oceanic island arc in the Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Res, 32: 213–231
Carmichael S K, Waters J A, Suttner T J, Kido E, DeReuil A A. 2014. A new model for the Kellwasser Anoxia Events (Late Devonian): Shallow water anoxia in an open oceanic setting in the Central Asian Orogenic Belt. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 399: 394–403
Chang J, Bai Z, Sun Y, Peng Y, Qin S, Shen B. 2017. High resolution bio- and chemostratigraphic framework at the Frasnian-Famennian boundary: Implications for regional stratigraphic correlation between different sedimentary facies in South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol,
Chen D, Qing H, Li R. 2005. The Late Devonian Frasnian-Famennian (F/F) biotic crisis: Insights from C, C and Sr/Sr isotopic systematics. Earth Planet Sci Lett, 235: 151–166
Chen D, Wang J, Racki G, Li H, Wang C, Ma X, Whalen M T. 2013. Large sulphur isotopic perturbations and oceanic changes during the Frasnian-Famennian transition of the Late Devonian. J Geol Soc, 170: 465–476
Chen X, Quan Q Q. 1992. Earliest Devonian graptolites from Ximeng, southwestern Yunnan, China. Australasian J Palaeontol, 16: 181–187
Chen X, Ni Y, Lenz A C, Zhang L, Chen Z, Tang L, Jin J. 2015. Early Devonian graptolites from the Qinzhou-Yulin region, southeast Guangxi, China. Can J Earth Sci, 52: 1000–1013
Chlupác I, Kukal Z. 1977. The boundary stratotype at Klonk. The Silurian-Devonian Boundary. IUGS Ser A, 5: 96–109
Chlupác I, Oliver W A. 1989. Decision on the Lochkovian-Pragian Boundary stratotype (Lower Devonian). Episodes, 12: 109–114
Copper P. 1994. Ancient reef ecosystem expansion and collapse. Coral Reefs, 13: 3–11
Da Silva A C, Hladil J, Chadimová L, Slavík L, Hilgen F J, Bábek O, Dekkers M J. 2016. Refining the Early Devonian time scale using Milankovitch cyclicity in Lochkovian-Pragian sediments (Prague Synform, Czech Republic). Earth Planet Sci Lett, 455: 125–139
Davidson T. 1853. On some fossil brachiopods, of the Devonian age, from China. Quarterly J Geol Soc London, 9: 353–359
De Koninck L. G. 1846. Notice sur deux especes de Brachiopodes du terrain Paleozoique de la Chine. Bulletin de l′Academie Royale des Sciences Lettres et Beaux Arts, 13: 415–426
De Vleeschouwer D, Rakociński M, Racki G, Bond D P G, Sobień K, Claeys P. 2013. The astronomical rhythm of Late-Devonian climate change (Kowala section, Holy Cross Mountains, Poland). Earth Planet Sci Lett, 365: 25–37
De Vleeschouwer D, Whalen M T, (Jed) Day J E, Claeys P. 2012. Cyclostratigraphic calibration of the Frasnian (Late Devonian) time scale (western Alberta, Canada). Geol Soc Am Bull, 124: 928–942
Foster G L, Royer D L, Lunt D J. 2017. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. Nat Commun, 8: 14845
Garcia-Alcalde, J. 1997. North Gondwanan Emsian events. Episodes, 20: 241–246
Geng L Y, Wang Y, Cai X Y, Tang P. 2000. Chitinozoan biostratigraphy in China. In: Palynoforas and Palynomorphs of China. Hefei: Press of University of Science and Technology of China. 209–241
Gerrienne P, Meyer-Berthaud B, Yang N, Steemans P, Li C S. 2014. Planatophyton gen. nov., a late Early or Middle Devonian euphyllophyte from Xinjiang, North-West China. Rev Palaeobot Palynol, 208: 55–64
Goddéris Y, Donnadieu Y, Le Hir G, Lefebvre V, Nardin E. 2014. The role of palaeogeography in the Phanerozoic history of atmospheric CO_2 and climate. Earth Sci Rev, 128: 122–138
Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M. 2012. The Geological Time Scale 2012, Volume 2. Amsterdam: Elsevier. 1144
Groos-Uffenorde H, Lethiers F, Blumenstengel H. 2000. Ostracodes and Devonian stratigraphy. Cour Forsch Inst Senckenberg, 220: 99–111
Guo W, Sun Y L, Baliński A. 2015. Parallel evolution of jugal structures in Devonian athyridide brachiopods. Palaeontology, 58: 171–182
Hao S G, Xue J Z. 2013. The Early Devonian Posongchong Flora of Yunnan——A Contribution to an Understanding of the Evolution and Early Diversification of Vascular Plants. Beijing: Science Press. 366
Hinnov L A. 2004. Earth′s orbital parameters and cycle stratigraphy. In: Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, eds. A Geologic Time Scale 2004. Cambridge: Cambridge University Press. 55–62
Hou H F. 1981. Devonian brachiopod biostratigraphy of China. Geol Mag, 118: 185–192
Hou H F, Chen X Q, Rong J Y, Ma X P, Zhang Y, Xu H K, Su Y Z, Xian S Y, Zong P. 2017. Devonian brachiopod genera on type species of China. In: Rong J Y, Jin Y G, Shen S Z, Zhan R B, eds. Phanerozoic Brachiopod Genera of China. Beijing: Science Press. 343–557
House M R. 2002. Strength, timing, setting and cause of mid-Palaeozoic extinctions. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 181: 5–25
Huang C, Gong Y. 2016. Timing and patterns of the Frasnian–Famennian event: Evidences from high-resolution conodont bios-

tratigraphy and event stratigraphy at the Yangdi section, Guangxi, South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 448: 317–338
Husson J M, Schoene B, Bluher S, Maloof A C. 2016. Chemostratigraphic and U-Pb geochronologic constraints on carbon cycling across the Silurian-Devonian boundary. Earth Planet Sci Lett, 436: 108–120
Ji Q, Wei J Y, Wang Z J, Wangt S T, Sheng H B, Wang H D, Hou J P, Xiang L W, Feng R L, Fu G M. 1989. The Dapoushang Section——An Excellent Section for the Devonian-Carboniferous Boundary Stratotype in China. Beijing: Science Press. 165
Ji Q, Ziegler W. 1993. The Lali section-an excellent reference section for Upper Devonian in South China. Cour Forsch Inst Senckenberg, 157: 183
Joachimski M M, Breisig S, Buggisch W, Talent J A, Mawson R, Gereke M, Morrow J R, Day J, Weddige K. 2009. Devonian climate and reef evolution: Insights from oxygen isotopes in apatite. Earth Planet Sci Lett, 284: 599–609
Joachimski M M, Pancost R D, Freeman K H, Ostertag-Henning C, Buggisch W. 2002. Carbon isotope geochemistry of the Frasnian–Famennian transition. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 181: 91–109
Kaiser S I. 2005. Mass extinctions, climatic and oceanographic changes at the Devonian-Carboniferous boundary. Doctorial Dissertation. Bochum: Ruhr-University. 1–156
Kaiser S I, Aretz M, Becker R T. 2016. The global Hangenberg Crisis (Devonian-Carboniferous transition): Review of a first-order mass extinction. Geol Soc London Spec Publ, 423: 387–437
Kaiser S I, Corradini C. 2011. The early Siphonodellids (Conodonta, Late Devonian-Early Carboniferous): Overview and taxonomic state. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen, 261: 19–35
Konigshof P, Silva A C D, Sutter T J, Kido E, Waters J, Carmichael S K, Jansen U, Pas D, Spassov S. 2016. Shallow-water facies setting around the Kačák Event: A multidisciplinary approach. In: Becker R T, Konigshof P, Brett C E, eds. Devonian Climate, Sea Level and Evolutionary Events. Geol Soc London Spec Publ, 423: 171–199
Liao W H, Ruan Y P. 2003. Devonian Biostratigraphy of China. In: Zhang W T, Chen P J, Palmer A R, eds. Biostratigraphy of China. Beijing: Science Press. 237–279
Liu J, Qie W, Algeo T J, Yao L, Huang J, Luo G. 2016. Changes in marine nitrogen fixation and denitrification rates during the end-Devonian mass extinction. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 448: 195–206
Liu Y Q, Ji Q, Kuang H W, Jiang X J, Xu H, Peng N. 2012. U-Pb zircon age, sedimentary facies, and sequence stratigraphy of the Devonian-Carboniferous boundary, Daposhang Section, Guizhou, China. Palaeoworld, 21: 100–107
Lu J F, Qie W K, Chen X Q. 2016. Pragian and lower Emsian (Lower Devonian) conodonts from Liujing, Guangxi, South China. Australasian J Palaeontol, 40: 275–296
Ma X, Gong Y, Chen D, Racki G, Chen X, Liao W. 2016. The Late Devonian Frasnian-Famennian Event in South China—Patterns and causes of extinctions, sea level changes, and isotope variations. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 448: 224–244
Ma X P, Liao W H, Wang D M. 2009. The Devonian System of China, with a discussion on sea-level change in South China. In: Königshof P, ed. Devonian Change: Case Studies in Palaeogeography and Palaeoecology. Geol Soc London Spec Publ, 314: 241–262
Ma X P, Wang C Y, Racki G, Racka M. 2008. Facies and geochemistry across the Early-Middle Frasnian transition (Late Devonian) on South China carbonate shelf: Comparison with the Polish reference succession. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 269: 130–151
Ma X P, Wang H H, Zhang M Q. 2017a. Devonian event succession and sea level change in South China—With Early and Middle Devonian carbon and oxygen isotopic data. Subcomm Devonian Stratigr Newsl, 32: 17–24
Ma X, Zhang M, Zong P, Zhang Y, Lü D. 2017b. Temporal and spatial distribution of the Late Devonian (Famennian) strata in the northwestern border of the Junggar Basin, Xinjiang, Northwestern China. Acta Geol Sin, 91: 1413–1437
Ma X P, Zhang Y B, Zhang M Q. 2014. Lithologic and biotic aspects of major Devonian events in South China. Subcomm Devonian Stratigr Newsl, 29: 21–33
Manda Š, Frýda J. 2010. Silurian-Devonian boundary events and their influence on cephalopod evolution: Evolutionary significance of cephalopod egg size during mass extinctions. Bull Geosci, 85: 513–540
McArthur J M, Howarth R J, Shields G A. 2012. Strontium Isotope Stratigraphy. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012, Volume 1. Amsterdam: Elsevier. 127–144
McGhee Jr. G R, Clapham M E, Sheehan P M, Bottjer D J, Droser M L. 2013. A new ecological-severity ranking of major Phanerozoic biodiversity crises. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 370: 260–270
Murphy M A. 2005. Pragian conodont zonal classification in Nevada, western North America. Rev Esp Palaeontol, 20: 177–206
Myrow P M, Ramezani J, Hanson A E, Bowring S A, Racki G, Rakociński M. 2013. High-precision U-Pb age and duration of the latest Devonian (Famennian) Hangenberg event, and its implications. Terra Nova, 26: 222–229
Nie T, Guo W, Sun Y L, Shen B, Yin B A, Tang Z H, Li Y K, Huang X

L, Mai C. 2016. Age and distribution of the Late Devonian brachiopod genus Dzieduszyckia Siemiradzki, 1909 in southern China, Palaeoworld, 25: 600–615

Ogg J G, Ogg G M, Gradstein F M. 2016. A concise Geologic Time Scale. Amsterdam: Elsevier. 232

Paproth E, Feist R, Flajs G. 1991. Decision on the Devonian-Carboniferous boundary stratotype. Episodes, 14: 331–336

Percival L M E, Davies J H F L, Schaltegger U, De Vleeschouwer D, Da Silva A C, Föllmi K B. 2018. Precisely dating the Frasnian-Famennian boundary: Implications for the cause of the Late Devonian mass extinction. Sci Rep, 8: 9578

Pribyl A. 1940. Graptolitová fauna ceského stredního Ludlow (svrchni eβ). Vestnik státniho geologického Ústavu, 16: 63–73

Qie W, Liu J, Chen J, Wang X, Mii H, Zhang X, Huang X, Yao L, Algeo T J, Luo G. 2015. Local overprints on the global carbonate δ^{13}C signal in Devonian-Carboniferous boundary successions of South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 418: 290–303

Qie W, Wang X D, Zhang X, Ji W, Grossman E L, Huang X, Liu J, Luo G. 2016. Latest Devonian to earliest Carboniferous conodont and carbon isotope stratigraphy of a shallow-water sequence in South China. Geol J, 51: 915–935

Racki G. 2005. Toward understanding Late Devonian global events: few answers, many questions. In: Over O J, Morrow J R, Wignal P B. 2005. Understanding Late Devonian and Permian-Triassic Biotic and Climatic Events, Towards an Integrated Approach. Amsterdam: Elsevier. 5–36

Saltzman M R, Thomas E. 2012. Carbon Isotope Stratigraphy. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2012, Volume 1. Amsterdam: Elsevier. 207–232

Sedgwick A, Murchison R I. 1839. Stratification of the older stratified deposits of Devonshire and Cornwall. Philos Mag, 3: 241–260

Sepkoski Jr. J J. 1996. Patterns of Phanerozoic extinction: A perspective from global data bases. In: Walliser O H, ed. Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic. Berlin: Springer-Verlag. 35–51

Slavík L, Brett C E. 2016. Minutes of the Ghent Business Meeting. Subcomm Devonian Stratigr Newsl, 31: 21–25

Slavík L, Carls P, Hladil J, Koptikova L. 2012. Subdivision of the Lochkovian Stage based on conodont faunas from the stratotype area (Prague Synform, Czech Republic). Geol J, 47: 616–631

Spalletta C, Perri M C, Over D J, Corradini C. 2017. Famennian (Upper Devonian) conodont zonation: Revised global standard. Bull Geosci, 92: 31–57

Stephens N P, Sumner D Y. 2003. Late Devonian carbon isotope stratigraphy and sea level fluctuations, Canning Basin, Western Australia. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 191: 203–219

Sun Y L, Bai S L. 1995. Lower range of *Stringocephalus*. Newsl Stratigr, 32: 73–77

Sun Y L, Boucot A J. 1999. Ontogeny of Stringocephalus gubiensis and the origin of Stringocephalus. J Paleontol, 73: 860–871

Sutter T J, Kido E, Chen X, Mawson R, Waters J A, Frýda J, Mathieson D, Molloy P D, Pickett J, Webster G D, Frýdová B. 2014. Stratigraphy and facies development of the marine Late Devonian near the Boulongour Reservoir, northwest Xinjiang, China. J Asian Earth Sci, 80: 101–118

van Geldern R, Joachimski M M, Day J, Jansen U, Alvarez F, Yolkin E A, Ma X P. 2006. Carbon, oxygen and strontium isotope records of Devonian brachiopod shell calcite. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 240: 47–67

Walliser O H. 1996. Global events in the Devonian and Carboniferous. In: Walliser O H, ed. Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic. Berlin: Springer-Verlag. 225–250

Wang C Y, Ziegler W. 1983. Conodonten aus Tibet. Neues Jahrbuch fur Geologie und Palaontologie. Monatshefre, (2): 69–79

Wang D M, Hao S G, Liu Z F. 2002. Researches on plants from the Lower Devonian Xujiachong Formation in the Qujing district, eastern Yunnan. Acta Geol Sin, 76: 393–407

Wang Y, Berry C M, Hao S G, Xu H H, Fu Q. 2007. The Xichong flora of Yunnan, China: Diversity in late Mid Devonian plant assemblages. Geol J, 42: 339–350

Wang Y, Xu H H. 2005. *Sublepidodendron grabaui* comb. nov., a lycopsid from the Upper Devonian of China. Bot J Linn Soc, 149: 299–311

Xu B, Gu Z, Wang C, Hao Q, Han J, Liu Q, Wang L, Lu Y. 2012. Carbon isotopic evidence for the associations of decreasing atmospheric CO_2 level with the Frasnian-Famennian mass extinction. J Geophys Res, 117: G01032

Xu H H, Berry C M, Wang Y. 2011. Morphological study on the Devonian zosterophyll Serrulacaulis Hueber and Banks: New materials and emendation. Palaeoworld, 20: 322–331

Xu H H, Marshall J E A, Wang Y, Zhu H C, Berry C M, Wellman C H. 2014. Devonian spores from an intra-oceanic volcanic arc, West Junggar (Xinjiang, China) and the palaeogeographical significance of the associated fossil plant beds. Rev Palaeobot Palynol, 206: 10–22

Xu H H, Wang Y. 2008. The palaeogeographical significance of specimens attributed to Protolepidodendron scharyanum Krejči (Lycopsida) from the Middle Devonian of North Xinjiang, China. Geol Mag, 145: 295–299

Xue J. 2009. Two zosterophyll plants from the Lower Devonian (Lochkovian) Xitun Formation of Northeastern Yunnan, China. Acta

Geol Sin, 83: 504–512
Yolkin E A , Kim A I, Weddige K, Talent J A, House M R. 1997. Definition of the Pragian/Emsian Stage boundary. Episodes, 20: 235–240
Yolkin E A., Weddige K, Izokh N G, Erina M. 1994. New Emsian conodont zonation (Lower Devonian). Cour Forsch Inst Senckenberg, 168: 139–157
Yu C M. 1988. Devonian-Carboniferous Boundary in Nanbiancun, Guilin, China: Aspects and Records. Beijing: Science Press. 379
Yu C M, Qie W K, Lu J F. 2018. Emsian (Early Devonian) Yujiang Event in South China. Palaeoworld, 27: 53–65
Zhao W, Jia G, Zhu M, Zhu Y. 2015. Geochemical and palaeontological evidence for the definition of the Silurian/Devonian boundary in the Changwantang Section, Guangxi, China. Estonian J Earth Sci, 64: 110–114
Zhao W, Wang N, Zhu M, Mann U, Herten U, Lücke A. 2011. Geochemical stratigraphy and microvertebrate assemblage sequences across the Silurian/Devonian transition in South China. Acta Geol Sin, 85: 340–353
Zheng D, Xu H, Wang J, Feng C, Zhang H, Chang S C. 2016. Geochronologic age constraints on the Middle Devonian Hujiersite flora of Xinjiang, NW China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 463: 230–237
Zhu M, Wang N Z, Wang J Q. 2000. Devonian macro- and microvertebrate assemblages of China. Cour Forsch Inst Senckenberg, 223: 361–372
Ziegler W, Klapper G. 1985. Stages of the Devonian System. Episodes, 8: 104–109
Zong P, Becker R T, Ma X. 2015. Upper Devonian (Famennian) and Lower Carboniferous (Tournaisian) ammonoids from western Junggar, Xinjiang, northwestern China—Stratigraphy, taxonomy and palaeobiogeography. Palaeobio Palaeoenv, 95: 159–202
Zong P, Ma X, Xue J, Jin X. 2016. Comparative study of Late Devonian (Famennian) brachiopod assemblages, sea level changes, and geo-events in northwestern and southern China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 448: 298–316

(责任编委: 沈树忠)